В брошюре описывается устройство программного управления фрезерным станком, построенное на базе серийного магнитофона МЭЗ-15. В ней рассматривается принцип действия устройства, приводится его общая принципиальная схема, схемы отдельных элементов, основные характеристики устройства и методика их измерения. Приводятся также сведения по следящему приводу и оснастке станка. Простота, компактность и использование серийных элементов делают возможным построение таких устройств силами небольшого коллектива специалистов любого предприятия.

Брошюра предназначена для подготовленных радиолюбителей. Она может быть также полезна специалистам по электронным устройствам автоматики.

6П2.15
Ш16

Шадрин Виталий Николаевич
Магнитофон управляет станком. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
48 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 444)

6П2.15

Редактор *С. Ф. Баваров* Техн. редактор *В. В. Емжин*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 23/XII 1961 г. Подписано к печати 5/VI 1962 г.
Т-08514 Бумага 84×108[1]/32 2,46 печ. л. Уч.-изд. л. 3,2
Тираж 60 000 экз. Цена 13 коп. Зак. 889.

1-я типография Профиздата. Москва, Крутицкий вал, 18.

ВВЕДЕНИЕ

Программное управление относится к тем областям науки и техники, которые в полную силу стали развиваться только в последнее время. По заранее заданной программе могут быть произведены почти все встречающиеся в производстве технологические операции, начиная от заготовки и резки металла и кончая сборкой и налаживанием сложнейших механизмов и машин. Программа, согласио которой должны производиться технологические операции, может непосредственно вводиться в исполнительный механизм, но может быть предварительно занесена в какой-либо элемент системы, способный длительное время хранить полученную информацию и от которого в любое время эту информацию можно получить.

К таким элементам, способным «запомнить» информацию, относятся перфорированные ленты и карты, магнитные леиты и барабаны, кинематографические леиты, триггерные ячейки, емкостиые и ультразвуковые накопители и ряд других. Наибольшее применение в качестве элемента памяти для укрепления фрезерными станками в настоящее время получила магнитная лента.

Магнитная запись программы по сравнению с другими видами запоминания имеет важные преимущества: высокую точность воспроизведения сигналов; многократное воспроизведение программы без ухудшения качества записи; многократное использование одиого и того же носителя записи для различных программ путем стирании предыдущей записи; сравнительная простота аппаратуры и пригодность ее для использоваиия в различных условиях; возможность немедленного контроля и воспроизведения записи без предварительной обработки носителя, а также длительного храиения магиитиых носителей без потери качества записи; легкость моитажа при обрывах или для создания комбинированной записи; относительио иебольшая стоимость носителей записи.

Главными недостатками магнитных леит как носителей информации являются: растяжение и деформация ленты при ее движении относительно головок; возможность пропадания записанных сигналов или появлеиия ложных сигиалов, вызванных несовершеиством покрытия леиты, а также порчи программы при попадаиии леиты в сильные магнитные поля; отсутствие видимости магнитной сигиалограммы. Отмеченные иедостатки не умоляют достоиист магиитиых лент, что и обусловило их широкое распространение.

Программа может быть записана иа магнитную леиту от вычислительного устройства, а в иекоторых других системах программиого управления непосредственно при обработке первой, «эталоииой», детали на станке или от специальиого копировальиого устройства.

Вычислительные машины, применяемые для составления программы обработки, могут быть универсальными или специализированными. Такие машины работают по программе, записанной на перфоленте, и имеют выход в виде специального цифрового кода. Для работы системы программного управления цифровой код должен быть преобразован в последовательность импульсов или в сигналы, модулированные по фазе. Эти сигналы, как правило, записываются на магнитную ленту, которая затем доставляется к станкам, имеющим устройства программного управления. Таким образом, одна цифровая машина может одновременно обслуживать несколько станков, цехов и даже заводов.

Применение для составления программы цифровых вычислительных машин особенно эффективно при индивидуальном производстве, когда нужно изготовить всего несколько штук сложных деталей. В этом случае применение копировального станка является нецелесообразным, так как стоимость изготовления шаблона выше и займет больше времени, чем подготовка программы на машине. Изготовление шаблона, а затем запись по копиру на магнитную ленту создают преимущества при мелкосерийном производстве, когда деталей сравнительно много, и шаблон быстро выходит из строя. Наконец, запись программы непосредственно при обработке первой детали может быть осуществлена только для сравнительно простых деталей по движениям рабочего, который может обработать деталь на малых подачах с целью получения наименьших ошибок при записи.

При воспроизведении эта программа может подаваться в несколько раз быстрее. Очевидно, что даже в этом простейшем случае программное управление повышает производительность, облегчает труд рабочего и удешевляет все производство в целом.

Системы программного управления пока что являются довольно дорогими и сложными. Поэтому ведутся разработки таких устройств, которые можно было бы осуществить на базе серийной продукции, выпускаемой нашей промышленностью.

ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Сущность программного управления состоит в том, что все операции технологического процесса принудительно подчиняются какому-либо определенному закону, причем все операции производятся без участия человека, но в соответствии с программой, подготовленной для машины заранее. Для заданной программы рассчитываются только узловые или опорные точки рассматриваемой операции. Эта программа рассчитывается в соответствии с характером технологического процесса и записывается на перфорированных лентах.

Перфорированная лента вводится в универсальную или специализированную цифровую вычислительную машину ЦВМ (рис. 1), которая со скоростью, достигающей десятков тысяч операций в секунду, рассчитывает весь технологический цикл и выдает программу в виде специального цифрового кода. Цифровой код не может быть непосредственно подан на устройства программного управления, а должен быть преобразован либо в унитарный код, либо в фазомодулированные сигналы. Унитарный код, использующийся для управления в импульсных системах, представляет последовательность им-

пульсов одинаковой длительности, но разной частоты следования и полярности. Частота следования импульсов определяет быстроту (скорость) производственного цикла, их число — величину перемещения детали или длительность обработки, а полярность — направление движения по координатам.

Унитарный код получается на выходе интерполятора с преобразователем *П*, включенным непосредственно после ЦВМ.

Программа в виде унитарного кода, как правило, записывается



Рис. 1. Блок-схема программного управления с использованием импульсных (цифровых) систем.

на магнитную ленту, которая затем через систему программного управления СПУ передается к станкам *С*.

В зависимости от принципа действия системы программного управления могут быть импульсными или фазовыми. Блок-схема импульсной системы программного управления приведена на рис. 2.

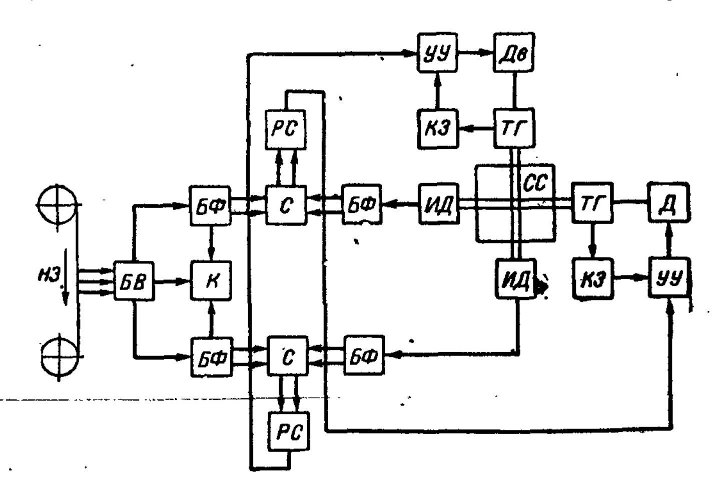


Рис. 2. Блок-схема импульсной (цифровой) системы программного управления.

НЗ — носитель записи (магнитная лента); *БВ* — блок воспроизведения; *БФ* — блоки формирования; *К* — схема контроля; *РС* — реверсивные счетчики; *С* — схема синхронизации; *ИД* — импульсные датчики обратной связи; *УУ* — устройство управления; *Д* — двигатели подачи стола станка; *ТГ* — тахогенераторы; *КЗ* — корректирующие звенья; *СС* — стол станка.

Программа обработки детали в виде унитарного кода записывается на отдельные дорожки магнитной ленты. Для управления станком в двух координатах требуется три дорожки, две из которых предназначаются для рабочих импульсов по координатам, а одна — для контрольных импульсов. Блок воспроизведения *БВ*, объединяющий в себе многоканальную магнитную головку и усилители воспроизведения, имеет выход на блок формирования *БФ*, который формирует и разделяет импульсы в зависимости от полярности на два входа схемы синхронизации *С*.

Схема контроля *К* служит для проверки числа импульсов при воспроизведении по принципу «чет—нечет». В случае отсутствия рабочего импульса или появления ложного схема контроля выдает сигнал предупреждения и прекращает работу станка. Схема синхронизации служит для разделения во времени командных импульсов с магнитной ленты и импульсов обратной связи с датчиков положения. При движении стола станка в одну сторону благодаря схеме синхронизации работает положительный канал командных импульсов и отрицательный канал импульсов обратной связи. При движении стола в противоположную сторону работа каналов рабочих импульсов и импульсов обратной связи также изменяется на противоположную. Таким образом, импульсы обратной связи уменьшают число импульсов, зафиксированных реверсивным счетчиком *PC* и тем самым уменьшают напряжение на силовом приводе следящей системы. Импульсный датчик обратной связи *ИД* преобразует линейное перемещение исполнительного звена в электрические импульсы и в зависимости от направления движения посылает их в положительный или отрицательный канал синхронизации.

Импульсные системы программного управления позволяют получить высокую точность обработки деталей.

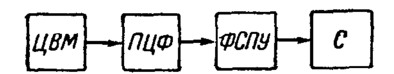


Рис. 3. Блок-схема программного управления с использованием фазовых систем.

Наряду с этим они обладают некоторыми недостатками, к которым относятся: высокая стоимость, трудность наладки, большое количество элементов, необходимость применения импульсного датчика обратной связи и невысокая надежность работы при высоком уровне электрических и механических помех.

Для большинства видов производства при сохранении применяемой точности использование фазовых систем программного управления позволяет избежать эти недостатки. В этом случае, так же как и для импульсных систем, программа подготавливается на цифровой вычислительной машине ЦВМ (рис. 3) и подается на элемент *ПЦФ* — преобразователь цифрового кода в фазомодулированные сигналы. Последние записываются на магнитную ленту, которая передается к станку, оснащенному фазовой системой программного управления ФСПУ.

Блок-схема ФСПУ приведена на рис. 4. На верхней части этого рисунка показана схема в режиме записи программы от работающего станка, а на нижней схеме в режиме воспроизведения.

В режиме записи сигнал от ГЭС, обычно 400—500 *гц*, подводится на фазорасщепитель *ФР*, расщепляющий сигнал на две составляющие со сдвигом по фазе на 90°. Это необходимо для работы поворотного трансформатора *ПТ* в режиме фазовращателя. Сигналы на выходе

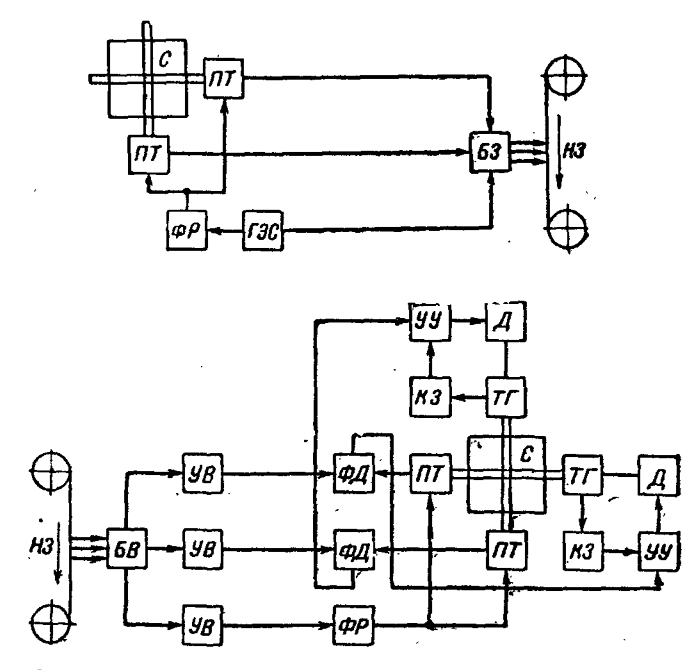


Рис. 4. Блок-схема фазовой системы программного управления.

ПТ — поворотный трансформатор; *ФР* — фазорасщепитель с усилителями; *ГЭС* — генератор эталонного сигнала; *БЗ* — блок записи; *УВ* — усилители воспроизведения; *ФД* — фазовые дискриминаторы; остальные обозначения те же, что на рис. 2.

ПТ будут иметь фазу, пропорциональную координатам перемещения стола станка. Промодулированные по фазе эталонный и рабочие сигналы подводятся к многоканальной магнитной головке и записываются на магнитную ленту.

В режиме воспроизведения сигналы, записанные на магнитной ленте, воспроизводятся теми же магнитными головками и усиливаются усилителями воспроизведения *УВ*. Эталонный сигнал подводится к фазорасщепителю *ФР*, который питает поворотные трансформаторы *ПТ*. Сигналы, идущие с *ПТ*, будут иметь по отношению к

рабочим сигналам с ленты некоторое фазовое рассогласование, зависящее от положения подач стола станка. Эти сигналы сравниваются в фазовых дискриминаторах *ФД*, на выходе которых получается напряжение, пропорциональное фазовому рассогласованию. Это напряжение усиливается в устройстве управления *УУ* и подается на двигатель постоянного тока *Д*, который перемещает стол станка до исчезновения рассогласования. В системе применяется обратная связь через корректирующие звенья *КЗ*.

Фазовые системы программного управления проще и надежнее импульсных, менее чувствительны к колебаниям температуры и питающих напряжений, ко всякого рода помехам, возникающим в производственных условиях, и обеспечивают приемлемую точность. Недостатком таких систем можно считать необходимость преобразования цифрового кода в фазомодулированные сигналы. Однако этот недостаток вполне окупается преимуществами таких устройств.

При записи программы от копировального устройства или по первой детали надобность в преобразователе отпадает вообще. Рассмотренные два способа записи программы являются простейшими и наиболее доступными для использования в заводских условиях.

Запись программы на магнитную ленту от копировального устройства осуществляется при обходе копировальной головкой эталонной детали, изготовленной ранее вручную с высокой степенью точности. Запись от копировальной головки производится на копировально-фрезерных станках, переоборудованных под программное управление.

Наиболее удобными для этого являются фрезерные станки с круговым методом обработки, или карусельно-фрезерные. В этом случае эталонная деталь закрепляется в шпинделе или поворотном столе, а копировальная головка присоединяется к поперечной подаче станка. В режиме записи шпинделю или поворотному столу задается небольшая скорость вращения, в пределах 1—2 *об/мин*.

Копировальная головка передвигается до упора с эталоном. В соответствии с конфигурацией эталонной детали положение копира изменяется относительно нулевого, в результате чего на выходе датчика, смонтированного в копировальной головке, возникает напряжение определенной величины и знака. Это напряжение подается на усилитель постоянного тока, а затем на усилитель мощности, который приводит во вращение электродвигатель поперечной подачи. Каретка стола начинает перемещаться в ту или иную сторону с определенной скоростью, в зависимости от знака и величины напряжения рассогласования, приходящего от датчика.

Поворотные трансформаторы *ПТ*, связанные с круговым и поперечным движением, при обходе копиром эталона выдают сигналы, фаза которых пропорциональна перемещению, а частота модуляции — скорости перемещения. Эти сигналы вместе с эталонным записываются на магнитную ленту. Магнитную ленту с записанной программой перематывают назад, копировальную головку отводят от эталона, а вместо него вставляют заготовку и подводят к ней фрезу. Перед началом обработки фрезу и заготовку устанавливают точно в таком же положении, как эталон и копир при записи. Такой способ записи программы применяется для сравнительно сложных деталей и может оказаться наиболее эффективным при мелкосерийном производстве.

Запись программы при обработке первой детали производится только для сравнительно простых деталей ступенчатого профиля по движениям квалифицированного рабочего. Такой способ записи может оказаться наиболее эффективным при работе на токарных станках, которые в этом случае оборудуются индивидуальными приводами по продольной и поперечной подачам каретки. Скорость вращения шпинделя может не регулироваться от программы, а задаваться постоянной.

Укрепив заготовку и включив станок, рабочий не очень быстро (до 60 *мм/мин*) подводит резец и начинает обработку, которую следует вести с большой точностью и без резких и лишних движений, так как все движения фиксируются на магнитной ленте. Закончив обработку, рабочий отводит резец от детали, выключает станок и перематывает ленту. Укрепив новую заготовку и установив каретку станка в такое же положение, которое она занимала при записи, рабочий включает магнитную ленту на воспроизведение. Далее весь процесс обработки совершается автоматически. Этот способ записи программы может оказаться эффективным только в том случае, когда один рабочий будет обслуживать несколько станков, оборудованных под программное управление, и когда таких деталей требуется сравнительно много.

Существует ряд операций, которые в настоящее время трудно описать математически, поэтому для таких операций невозможно изготовить программу работы для цифровой вычислительной машины. В этом случае единственно возможными способами записи программы будут записи от копира по первой детали или по первому «эталонному» циклу.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА

В приведенной на рис. 4 схеме фазовой системы программного управления используется многодорожечная магнитная запись на ленте шириной 12,7 *мм*. Вследствие этого в фазовой системе программного управления применяется блок многоканальных магнитных головок и специальный лентопротяжный механизм, требующие изготовления по высшему классу точности.

Поэтому представляет интерес использовать для программного управления серийные магнитофоны МАГ-8 или МЭЗ-15, по возможности ничего в них не переделывая, а только приспособив для нового назначения. Так как в этих магнитофонах применены стандартные ленты (6,35 *мм*) и магнитные головки, требуется специальный вид магнитной записи с частотным или временным разделением каналов.

Частотное разделение каналов более удобно и выгодно отличается от временного разделения сравнительной простотой. Оно может быть осуществлено двумя способами.

Первый способ заключается в использовании для каждой координаты подачи собственных отдельных частот. Такой способ может быть успешно использован при построении дискретных систем по принципу «включено — выключено», при котором наличие сигнала данной частоты означает команду на включение соответствующей подачи, а его отсутствие на выключение. Реализация системы программного управления при таком способе наталкивается на некото-

рые затруднения. К ним в первую очередь относится необходимость иметь для каждой координаты подачи свои опорные сигналы, которые должны записываться на отдельную дорожку, и как следствие этого необходимость двух магнитных дорожек.

Второй способ позволяет обойтись одной частотой для всех координат и для опорного сигнала. В этом случае для разделения рабочих сигналов применяется амплитудная модуляция колебаний отдельных несущих частот по каждой координате. Такой способ частотного разделения позволяет использовать для программного управления серийные магнитофоны без переделок. К магнитофону добавляется электронный блок, осуществляющий модуляцию, разделение и усиление сигналов, который вставляется в корпус магнитофона.

Для этой цели очень удобен магнитофон МЭЗ-15, корпус которого позволяет разместить всю электронную часть системы программного управления.

Устройство программного управления, построенное на базе магнитофона МЭЗ-15, обеспечивает запись и воспроизведение команд по продольной и поперечной подачам фрезерного станка. Как уже отмечалось, устройство основано на частотном разделении каналов и поэтому в нем используются стандартные магнитные головки.

Вместе с опорным сигналом на ленту записываются две несущие частоты, соответствующие двум подачам стола станка. Для этого в устройстве программного управления применены следующие частоты: 400 *гц* — опорная (она же рабочая), записывается на ленту непосредственно; 2 100 *гц* — несущая первого канала (поперечная подача) и 4 900 *гц* — несущая второго канала (продольная подача). Несущие частоты модулируются рабочей по амплитуде.

Таким образом, данная система использует двойную модуляцию, так как рабочая частота модулируется по фазе перемещением, а несущие по амплитуде рабочими. Такой способ разделения каналов с двойной модуляцией обозначается кратко ФМ-АМ (двойная фазово-амплитудная модуляция).

Принято считать, что опорный сигнал имеет нулевую фазу ($\varphi_0 = 0$) и, следовательно, его можно представить как

$$U = U_0 \cos \omega_0 t. \tag{1}$$

Рабочие сигналы до вторичной модуляции (т. е. идущие непосредственно с фазовращателей) по координатам x и y равны:

$$\left.\begin{aligned} U_{1x} &= U_0 \cos(\omega_0 t + \theta_x), \\ U_{1y} &= U_0 \cos(\omega_0 t + \theta_y), \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

где θ_x и θ_y — фазы сигналов перемещений по координатам.

В общем случае эта фаза является функцией времени и может быть выражена как

$$\theta = iv(t), \tag{3}$$

или

$$\theta = il(t),$$

где i — передаточное отношение, показывающее, на сколько миллиметров перемещения стола станка приходится 1° поворота вращающегося трансформатора или 1° изменения фазы рабочего сигнала;

$v(t)$ — скорость перемещения стола станка;

$l(t)$ — величина перемещения стола станка.

В случае записи программы для равномерного движения стола станка фаза сигнала изменяется линейно:

$$\theta = ivt = iL, \tag{4}$$

где L — величина перемещения стола станка за время t.

Для окружности $l(t) = l \sin \Omega t$, где Ω — угловая частота движения стола станка по координате. Поэтому

$$\theta = il \sin \Omega t. \tag{5}$$

Очевидно, что для того чтобы сигналы, определяемые формулами (1) и (2), записать на одну магнитную дорожку, их надо сместить друг относительно друга по частотной шкале. Для этой цели служит амплитудная модуляция, в результате которой получим:

$$\left.\begin{aligned} U_x &= U[1 + m\cos(\omega_0 t + \theta_x)] \sin \omega_x t; \\ U_y &= U[1 + m\cos(\omega_0 t + \theta_y)] \sin \omega_y t, \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

где ω_x и ω_y — несущие частоты первого и второго каналов с амплитудой U;

m — коэффициент, характеризующий глубину амплитудной модуляции и в предельном случае, когда амплитуды боковых частот составляют половину амплитуды несущей, равный единице (100%-ная модуляция).

Очевидно, что при воспроизведении записанной подобным способом информации сигналы должны быть разделены частотными фильтрами и подвергнуты демодуляции. Следует отметить, что запись эталонной (опорной) частоты одновременно с рабочими сигналами не компенсирует полностью фазовую погрешность, вызываемую колебаниями скорости движения магнитной ленты.

Рассмотрим это явление на примере записи прямой линии. Длина волны эталонного сигнала при скорости записи $v_з$ равна:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi v_з}{\omega_0}. \tag{7}$$

Длина волны рабочего сигнала по координате x при записи прямой линии равна:

$$\lambda_x = \frac{2\pi v_з}{\omega_x} = \frac{2\pi v_з}{\omega_0 + iv}. \tag{8}$$

Здесь частота рабочего сигнала ω_x представлена в виде суммы двух частот: частоты эталонного сигнала ω_0 и частоты вращения поворотного трансформатора, которая равна при отработке прямой линии произведению передаточного числа от стола станка к поворотному трансформатору на скорость перемещения,

Эти рассуждения станут еще более ясными, если воспользоваться выражением для фазы эталонного сигнала (4) и подставить ее значение в формулу (2). В этом случае получим:

$$U_{1x} = U_0 \cos(\omega_0 t + ivt) = U_0 \cos(\omega_0 + iv)\, t. \quad (9)$$

Формула (9) показывает, что для прямой линии фазово-модулированный сигнал можно представить как частотно-модулированный с частотой модуляции, равной частоте вращения поворотного трансформатора. Причем в зависимости от направления вращения поворотного трансформатора частота рабочего сигнала будет больше или меньше частоты эталонного сигнала на величину iv.

При воспроизведении со скоростью $v_в$ оба сигнала (рабочий и эталонный) могут быть представлены в виде

$$U = U_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} = U_0 \sin \frac{2\pi v_в t}{\lambda}, \quad (10)$$

поэтому эталонный сигнал при воспроизведении будет равен:

$$U_0 = U \sin \frac{2\pi v_в}{2\pi v_з}\, \omega_0 t = U \sin \frac{v_в}{v_з}\, \omega_0 t; \quad (11)$$

рабочий сигнал в этом случае равен:

$$U_x = U \sin \frac{2\pi v_в}{2\pi v_з} (\omega_0 + iv)\, t = U \sin\left(\frac{v_в}{v_з}\, \omega_0 t + \frac{v_в}{v_з}\, i\, v\, t\right). \quad (12)$$

Из этих формул следует, что при скорости воспроизведения, равной скорости записи, фаза рабочего сигнала при воспроизведении не отличается от фазы рабочего сигнала при записи

$$\theta_x = i\, v\, t. \quad (13)$$

В случае неравенства скорости движения магнитной ленты при записи и при воспроизведении программы фаза рабочего сигнала за одно и то же время t изменится на бо́льшую или меньшую величину пропорционально отношению $\frac{v_в}{v_з}$. Следовательно, повышая скорость воспроизведения можно без увеличения статической ошибки на столько же повысить скорость обработки детали.

Теперь предположим, что скорость воспроизведения неравномерна. В этом случае

$$x = v_0 t \pm \Delta x f(t), \quad (14)$$

поэтому получим (при $v_з = v_в = v_0$) следующее выражение для эталонного сигнала:

$$U_0 = U \sin\left[\omega_0 t \pm \frac{\Delta x}{v_0}\, \omega_0 f(t)\right], \quad (15)$$

рабочий сигнал при этом равен:

$$U_x = U \sin\left\{\left[\omega_0 t \pm \frac{\Delta x}{v_0}\, \omega_0 f(t)\right] + \left[i\, v\, t \pm \frac{\Delta x}{v_0}\, i\, v f(t)\right]\right\}. \quad (16)$$

Из этих формул следует, что при колебании скорости движения носителя записи при воспроизведении рабочий сигнал получит дополнительную фазовую погрешность, которая не может быть скомпенсирована эталонным сигналом. Эта погрешность равна:

$$\upsilon_{макс} = i\, v \frac{\Delta x}{v_0}. \quad (17)$$

Последнее выражение показывает, что фазовая погрешность, обусловленная колебаниями скорости движения носителя записи при воспроизведении, прямо пропорциональна передаточному отношению и скорости движения стола станка. Поэтому для получения большей точности надо уменьшать скорость обработки детали.

В случае записи синусоидальной кривой выражение фазовой ошибки от колебаний скорости усложняется, но общий вывод справедлив и для этого случая: для уменьшения фазовых искажений от колебаний скорости движения носителя записи при воспроизведении надо уменьшать скорость обработки детали и увеличивать скорость движения магнитной ленты при записи.

Для фазовой модуляции рабочих сигналов в функции перемещения стола станка в устройстве программного управления используются серийные поворотные трансформаторы типа ВТМ, включенные в режим фазовращателя. Для осуществления этого режима поворотные трансформаторы требуют питания от мощных усилителей. Номинальное напряжение, необходимое для нормальной работы таких трансформаторов, на частоте 400 *гц* равно 50 *в*.

Для получения режима фазовращателя питающее напряжение должно быть двухфазным (иметь две составляющие, сдвинутые под углом 90° друг относительно друга). Питающее напряжение подается на статорные обмотки. Напряжение, индуктируемое на роторной обмотке, определяется следующим образом:

$$U = M_1 \omega I_0 \cos \omega_0 t + M_2 \omega I_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (18)$$

где M_1 и M_2 — соответствующие коэффициенты взаимоиндукции между статорными и роторными обмотками.

Если статорные обмотки одинаковы, то коэффициент взаимоиндукции одной из статорных обмоток с роторной будет равен:

$$M_1 = M \sin\theta. \quad (19)$$

В то же время коэффициент взаимоиндукции другой статорной обмотки, расположенной перпендикулярно к первой, с той же роторной определяется как

$$M_2 = M \cos\theta. \quad (20)$$

В этих выражениях θ является геометрическим углом между роторной и одной из статорных обмоток. Подставляя M_1 и M_2 в формулу (18), получим:

$$U = \omega M I_0 \cos \omega_0 t \cdot \sin\theta + \omega M I_0 \sin \omega_0 t \cos\theta. \quad (21)$$

Из этой формулы следует, что напряжение, индуктируемое в роторной обмотке, выражается через суммы углов:

$$U = U_0 \sin(\omega_0 t + \theta), \quad (22)$$

где

$$U_0 = \omega M I_0. \quad (23)$$

Анализируя значение индуктируемого напряжения U_0 замечаем, что для правильной работы фазовращателя при изменениях частоты питающего напряжения требуется вводить жесткую стабилизацию по напряжению в усилителях питания поворотных трансформаторов.

Таким образом, выходное напряжение *ПТ*, включенного в режим фазовращателя, имеет сдвиг по фазе, равный механическому углу поворота ротора относительно статора, т. е. включенный в такой режим поворотный трансформатор осуществляет фазовую модуляцию подаваемого на него сигнала. Устанавливая для каждой

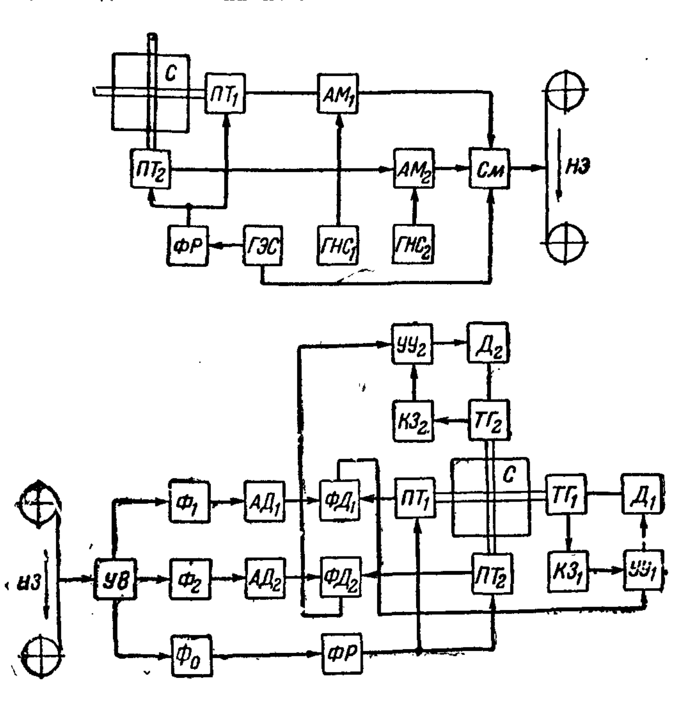


Рис. 5. Блок-схема фазовой системы программного управления с частотным разделением каналов.

координаты стола станка по одному *ПТ*, можно промодулировать сигналы по фазе в соответствии с перемещением стола.

Система программного управления с частотным разделением каналов отличается от обычной системы, использующей многодорожечную магнитную запись, наличием дополнительных элементов, обеспечивающих модуляцию и демодуляцию рабочих сигналов. Блок-схема системы программного управления с частотным разделением приведена на рис. 5. Добавочными элементами по сравнению со схемой, приведенной на рис. 4, являются: $ГНС_1$ и $ГНС_2$ — генераторы несущих частот; $АМ_1$ и $АМ_2$ — амплитудные модуляторы; *См* — смеситель сигналов при записи на одну магнитную дорожку; $Ф_1$ и $Ф_2$ — полосовые фильтры; $Ф_0$ — фильтр эталонного сигнала; $АД_1$ и $АД_2$ — амплитудные демодуляторы.

Режим записи в этой системе отличается тем, что промодулированные по фазе рабочие сигналы не сразу поступают на головку записи, а предварительно преобразовываются в блоках *АМ*, где происходит модуляция колебаний несущих частот, идущих от генераторов *ГНС* по амплитуде, рабочими сигналами, поступающими с *ПТ*.

В результате этого сигналы, выходящие с *АМ*, оказываются смещенными по частотной шкале друг относительно друга и относительно эталонного сигнала, который записывается на ленту непосредственно, без вторичной модуляции. Эталонный сигнал и смещенные по частотной шкале (модулированные) рабочие сигналы смешиваются в линейном смесителе, а затем записываются одной магнитной головкой на одну магнитную дорожку.

В режиме воспроизведения рабочие сигналы с ленты, усиленные *УВ*, разделяются между собой полосовыми фильтрами *Ф* и поступают на амплитудные демодуляторы *АД*. Эталонный сигнал отделяется при помощи дроссельного фильтра низкой частоты $Ф_0$ и идет на фазорасщепитель и другие элементы точно так же, как и в системе с многодорожечной магнитной записью.

Амплитудные демодуляторы *АД* осуществляют выпрямление отфильтрованных полосовыми фильтрами несущих, после чего их огибающие восстанавливаются в дроссельных фильтрах, аналогичных фильтру эталонного сигнала $Ф_0$. После этого рабочие сигналы поступают на фазовые дискриминаторы, в которых происходит сравнение их фазы с фазой сигнала отработки, идущего с поворотных трансформаторов *ПТ*. Фазовые дискриминаторы при наличии рассогласования выдают сигналы, управляющие приводами стола станка, и станок приходит в движение, т. е. в этой части работа *СПУ* с частотным разделением каналов не отличается от работы фазовых систем с многодорожечной магнитной записью сигналов.

СХЕМА И ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВА

Электронная часть устройства программного управления, построенного на базе магнитофона МЭЗ-15, собирается на лампах пальчиковой серии и полупроводниковых диодах. Все лампы питаются от общего выпрямителя, имеющего на выходе 250 *в* нестабилизированного напряжения, +250 *в* и —150 *в* стабилизированного.

Источник нестабилизированного напряжения должен обеспечивать ток порядка 500 *ма*, источник стабилизированного напряжения 100 *ма* по каждому выходу. Цепь питания канала источника должна выдерживать ток до 20 *а*.

Стабилизированные напряжения +250 *в* и —150 *в* подаются только на усилители постоянного тока. Все остальные элементы *СПУ* питаются нестабилизированным напряжением.

Электронная часть устройства собрана на отдельном шасси, которое вставляется в корпус магнитофона. Общая принципиальная схема этого блока приведена на рис. 6. На этой схеме показаны все переходные трансформаторы, входящие в электронный блок, который

Таблица

Обозначения на схемах	Первичная обмотка		Вторичная обмотка		Сердечник	
	Число витков	Марка и диаметр провода	Число витков	Марка и диаметр провода	Материал	Форма и размер
$Тр_1$, $Тр_3$, $Тр_6$	1 000	ПЭВ 0,12	2×1 000	ПЭВ 0,12	Пермаллой 0,3579НМ	Ш-12×16
$Тр_2$	2×1 000	ПЭВ 0,12	1 000	ПЭВ 0,12	То же	Ш-12×16
$Тр_4$	1 500	ПЭВ 0,25	2×1 500	ПЭВ 0,25	Сталь 0,35ХВП	Ш-20×20
$Тр_5$	2× (1 300+2 00)	ПЭВ 0,25	1 500	ПЭВ 0,25	То же	Ш-20×30
Dp_1	4 000	ПЭВ 0,12	—	—	Пермаллой 0,3579НМ	Ш-12×16
L_1	2 500+500	ПЭВ 0,12	—	—	Феррит	20×8,5×20*
L_2	2×250	ПЭВ 0,12	—	—	То же	20×8,5×20*
L_3, L_4, L_5	2 100	ПЭВ 0,49	—	—	Альсифер ТЧ-60	60×40×14*

* Наружный диаметр × внутренний диаметр × высота.

Рис. 6. Блок-схема фазовой системы программного управления с ис пользованием серийного магнитофона МЭЗ-15.

УЗ — усилители записи; *ГЗ* — головка записи; *МЛ* — магнитная лента; *ГВ* — головка воспроизведения; *УВ* — усилитель воспроизведения; *ГЭС* — генерато эталонного сигнала; $АМ_1$ и $АМ_2$ — амплитудные модуляторы; $ГНС_1$ и $ГНС_2$ — генераторы несущих сигналов; $УФР_1$ и $УФР_2$ — усилители мощности для пита ния поворотных трансформаторов $ПТ_1$ и $ПТ_2$; $Ф_0$ — фильтр эталонного сигнала $Ф_1$ и $Ф_2$ — фильтры несущих частот; $Ф_{01}$ и $Ф_{02}$ — фильтры рабочих сигналов $У_1$ и $У_2$ — усилители рабочих сигналов; $ФД_1$ и $ФД_2$ — фазовые дискриминаторы по двум подачам; $УПТ_1$ и $УПТ_2$ — усилители постоянного тока по двум по дачам; *ЭМУ* — электромашинный усилитель.

будет в дальнейшем именоваться частотным блоком. Основные узлы частотного блока, показанные на рисунке квадратами, будут описаны отдельно. Данные катушек индуктивностей, дросселей и трансформаторов сведены в таблицу.

Как уже отмечалось ранее, усилители записи *УЗ* и воспроизведения *УВ* магнитофона МЭЗ-15 переделкам не подвергаются. Головки записи *ГЗ* и воспроизведения *ГВ* используются также от магнитофона. Пульт управления остается без переделок.

Коммутация частотного блока осуществляется при помощи шести двухполюсных тумблеров $П_0$, $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$ и $П_5$, из которых $П_3$ включает анодное нестабилизированное напряжение +250 *в*, $П_4$ переключает это напряжение на элементы, работающие при записи или воспроизведении, а $П_5$ включает одновременно стабилизированные напряжения +250 *в* и —150 *в* на усилители постоянного тока. Усилители записи и воспроизведения *УЗ* и *УВ* включаются обычным путем. Накал всех ламп частотного блока включается при подключении выпрямителя к сети. Выпрямитель используется обычный, он непосредственно не входит в СПУ и поэтому на схеме не показан.

Чтобы не загромождать схему, на рис. 6 не показаны цепи питания отдельных узлов. Нестабилизированное напряжение +250 *в* независимо от режима (запись или воспроизведение) подается от переключателя $П_3$ сразу на блоки $УФР_{1,2}$, в режиме записи переключатель $П_4$ подает это напряжение на амплитудные модуляторы $АМ_1$ и $АМ_2$, на генератор эталонного сигнала ГЭС и генераторы несущих частот $ГНС_1$ и $ГНС_2$, а в режиме воспроизведения на усилители рабочих сигналов $У_1$ и $У_2$. Стабилизированные напряжения +250 *в* и —150 *в* подаются непосредственно на усилители постоянного тока $УПТ_1$ и $УПТ_2$, которые работают при записи от копира или по первой детали.

Принцип работы частотного блока ясен из рисунка и из предыдущего описания, необходимо отметить только некоторые особенности. Как видно из схемы, при записи программы можно непосредственно контролировать воспроизведение на выходе общего усилителя *УВ* и отдельно по каждым каналам: на выходе фильтра $Ф_0$ — эталонный сигнал, а на выходе фильтров $Ф_{01}$ и $Ф_{02}$ — рабочие сигналы. Это создает большие удобства при налаживании фильтров и всей системы в целом, так как точность обработки деталей на станке в значительной степени определяется работой электронной схемы воспроизведения.

В режиме записи напряжение с выходных обмоток поворотных трансформаторов $ПТ_1$ и $ПТ_2$ подается не сразу на амплитудные модуляторы $АМ_1$ и $АМ_2$, а через делители напряжения на переменных сопротивлениях, что необходимо для регулировки коэффициента модуляции. Смешивание записываемых рабочих сигналов с эталонным происходит в линейном смесителе, собранном на сопротивлениях, после чего все сигналы подаются на вход усилителя записи магнитофона. В смесителе предусмотрена регулировка уровня каждого сигнала. Общий уровень записи регулируется непосредственно в усилителе записи. Для того чтобы вход *УЗ* не шунтировал амплитудные модуляторы, последние развязаны относительно *УЗ* сопротивлениями.

В режиме воспроизведения смесь сигналов, усиленная усилителем, воспроизведения *УВ* магнитофона через развязывающие высокоомные сопротивления поступает на фильтр эталонного сигнала и фильтры несущих частот. Развязка на сопротивлениях необходима для того, чтобы низкоомный выход *УВ* не нарушал работу фильтров.

Отфильтрованный эталонный сигнал подается на емкостный фазорасщепитель и далее на усилители *УФР*, обеспечивающие работу $ПТ_1$ и $ПТ_2$. Рабочие сигналы, сглаженные фильтрами $Ф_{01}$ и $Ф_{02}$ предварительно усиливаются в усилителях $У_1$ и $У_2$ и подаются на фазовые дискриминаторы $ФД_1$ и $ФД_2$.

В некоторых случаях, например при плохой настройке полосовых фильтров и амплитудных модуляторов, последние могут быть сильно зашунтированы линейным смесителем при записи и делителем при воспроизведении. Кроме того, при плохих элементах фильтра $Ф_0$ уровень эталонного сигнала может оказаться низким. В этом случае после фильтра $Ф_0$ можно поставить усилитель такого же типа, как усилители рабочих сигналов $У_1$ и $У_2$. Смешивание сигналов при записи и разделение их при воспроизведении может быть осуществлено также на электронных лампах.

ГЕНЕРАТОР ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА

Для питания поворотных трансформаторов $ПТ_1$ и $ПТ_2$ используется генератор эталонного сигнала *ГЭС*, дающий при записи сигнал частоты 400 *гц*. Для обеспечения наименьших фазовых ошибок системы при записи программы генератор должен иметь стабильную амплитуду и частоту и малый коэффициент нелинейных искажений. Нестабильность генератора по частоте создает фазовые искажения в фазорасщепителе, а нелинейные искажения создают погрешности в фазорасщепителях и фазовых дискриминаторах. Нестабильность амплитуды генератора сказывается на крутизне дискриминаторов.

Отмеченным требованиям удовлетворяют большинство генераторов типа *RC*. В системе применен простейший генератор (рис. 7), собранный на левой половине лампы *6Н1П* с фазосдвигающей цепочкой *RC*. Элементы цепи обратной связи подобраны таким образом, что обеспечивается возникновение колебаний на резонансной частоте, равной 400 *гц*, которая в небольших пределах может регулироваться потенциометром в цепи обратной связи.

Генератор должен выдавать на емкостный фазорасщепитель сигнал напряжением порядка 3 *в*. Для развязки генератора от фазорасщепителя и создания оптимальных условий работы последнего они соединены между собой при помощи буферного каскада, работающего на трансформатор $Тр_1$, вторичная обмотка которого имеет среднюю точку, соединенную с шасси. При таком включении трансформатора получается равенство амплитуд составляющих двухфазного напряжения в фазорасщепителе. Уровень подаваемого на фазорасщепитель сигнала регулируется потенциометром, включенным в сеточную цепь буферного каскада. В некоторых случаях из-за плохого качества сопротивлений и конденсаторов, входящих в схему генератора, колебания могут не возникнуть. Тогда можно использовать другую, более совершенную схему генератора с усилением в цепи обратной связи.

Схема такого генератора, собранного на обеих половинах лампы *6Н1П*, приведена на рис. 8. Буферный каскад необходим и в этом

случае, для чего требуется еще одна лампа. Показанный на схеме рис. 8 генератор имеет менее критичные условия самовозбуждения, но сложнее предыдущего, и занимает больше места.

ГЕНЕРАТОРЫ НЕСУЩИХ ЧАСТОТ

Оба генератора несущих частот собраны на лампах *6Н1П* по трехточечной схеме с заземленным анодом (по переменному току) и автотрансформаторной обратной связью в цепи катода (рис. 9). Включение генератора по такой схеме имеет некоторое преимущество, заключающееся в том, что постоянная составляющая анодного тока проходит только по части катушки L_1, и недостаток — подобное включение индуктивности создает критичные условия самовозбуждения на низких частотах. Для создания более легких условий самовозбуждения и получения достаточной величины выходного сигнала, требующегося для модулятора (последний работает с сеточными токами), обе половины триода 6Н1П включены параллельно.

Потенциометр в цепи катода лампы *6Н1П* регулирует порог самовозбуждения генератора. Катушка L_2 имеет среднюю точку, на которую подаются рабочие сигналы с выхода *ПТ*. Для обоих гене-

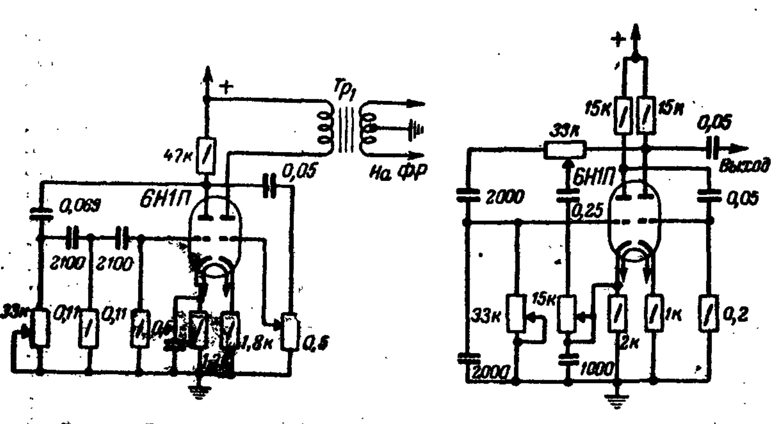


Рис. 7. Генератор эталонного сигнала.

Рис. 8. Генератор эталонного сигнала с усилением в цепи обратной связи.

раторов применяются одинаковые катушки с одним и тем же числом витков. Требуемая частота генераторов подбирается с помощью конденсатора *С*, образующего с индуктивностью L_1 колебательный контур. Необходимое напряжение обратной связи подается в цепь катода лампы от части обмотки катушки L_1. Коэффициент автотрансформации должен быть выбран с таким расчетом, чтобы обеспечить уверенный режим самовозбуждения и небольшой ток лампы. Как уже отмечалось, режим самовозбуждения может в некоторых пределах регулироваться при помощи потенциометра в цепи катода.

В качестве варианта для генераторов несущих частот можно рекомендовать генератор с индуктивной обратной связью. Такие генераторы менее критичны при настройке, но имеют недостаток: через катушку L_1 протекает постоянная составляющая анодного тока лампы. Можно развязать катушку относительно анода лампы емкостью, но применение такой схемы мало оправдано, так как в этом случае снижается добротность контура, что ухудшает условия самовозбуждения.

Рис. 9. Генератор несущей частоты.

АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ

Амплитудные модуляторы предназначены для смещения рабочих сигналов по частотной шкале с целью осуществления однодорожечной магнитной записи.

Модуляторы должны иметь минимум нелинейных искажений модулирующего сигнала при достаточно высоком коэффициенте амплитудной модуляции. Чем больше коэффициент амплитудной модуляции, тем выше амплитуда записываемого рабочего сигнала и тем выше амплитуда сигнала при воспроизведении и лучше помехоустойчивость системы. Очевидно, что для лучших условий воспроизведения сигнал, идущий с магнитной ленты, должен быть по возможности большим. Поэтому надо выбирать коэффициент модуляции близким к единице (100%). Однако следует иметь в виду, что при этом могут возникать нелинейные искажения модулирующего (рабочего) сигнала в модуляторе, которые создают фазовые искажения в фазовращателе и фазовом дискриминаторе при воспроизведении. Исходя из этого, обычно выбирают коэффициент модуляции в пределах 0,7—0,8 (70—80%).

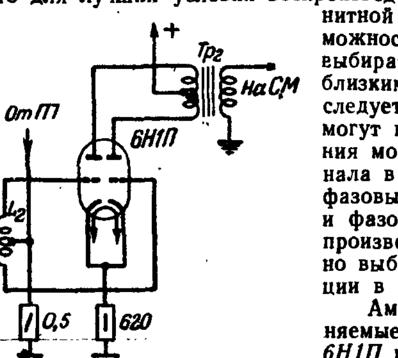


Рис. 10. Амплитудный модулятор.

Амплитудные модуляторы, применяемые в системе, собраны на лампах *6Н1П* и работают в режиме сеточной модуляции (рис. 10). Сигналы несущих частот подаются со вторичной обмотки катушки индуктивности генераторов *ГНС* на обе сетки лампы *6Н1П* в противофазе, в то время как сигналы модулирующих (рабочих) частот поступают на эти сетки со средней точки вторичной обмотки в фазе.

Так как первичная обмотка выходного трансформатора ($Тр_2$) имеет среднюю точку, в выходном напряжении отсутствуют четные гармоники несущих частот, что имеет существенное значение, так

как при неправильном выборе средней частоты полосы пропускании разделительных фильтров последние могут пропустить вторые гармоники несущих сигналов, имеющих более низкие частоты. Поэтому на правильный выбор несущих частот и на точность симметрии выходного трансформатора следует обращать самое серьезное внимание.

Точная симметрия первичной обмотки выходного трансформатора $Тр_2$ и обмотки катушки L_1, на среднюю точку которой подается модулирующий рабочий сигнал, важна еще и потому, что при полной симметрии этих элементов в выходном напряжении последнего будет отсутствовать сигнал 400 *гц*, так как его напряжение находится на обеих половинах первичной обмотки трансформатора $Тр_2$ в противофазе. Вследствие этого при воспроизведении на эталонный сигнал не будет наложена помеха. В противном случае, особенно при отсутствии симметрии трансформатора, на ленту вместе с модулированными несущими будет записан сигнал, близкий по частоте к эталонному, который не будет отфильтрован фильтром эталонной частоты $Ф_0$ и вызывает фазовые искажения эталонного сигнала. Поэтому несимметрия выходного трансформатора не должна превышать 0,5% по индуктивному сопротивлению. Для того чтобы осуществить практически такие требования, первичная обмотка трансформатора $Тр_2$ должна наматываться секционированно при строгом соблюдении равенства числа витков обеих половин. Пакет трансформатора должен собираться из пластин с высокими магнитными свойствами (с большой магнитной проницаемостью), желательно из сплава типа пермаллой (80 НХС). Так как в данном устройстве модулятор работает на высокоомную нагрузку, коэффициент трансформации $Тр_2$ можно сделать равным единице. Сопротивление в цепи катодов лампы модулятора служит для создания необходимых условий модуляции в сеточных цепях.

Для нормальной работы амплитудного модулятора на его сетки необходимо подавать напряжение несущей частоты порядка 3 *в*, а напряжение модулирующей (рабочей) частоты — около 2 *в*.

АМПЛИТУДНЫЕ ДЕМОДУЛЯТОРЫ

Для выделения огибающих модулированных несущих колебаний в системе используются двухполупериодные демодуляторы (рис. 11), что необходимо для компенсации фазовых искажений рабочих сигналов, возникающих при прохождении через полосовые фильтры. Для полной компенсации этих искажений полосовые фильтры должны иметь симметричную, а еще лучше прямолинейную фазовую характеристику в полосе прозрачности. При прохождении амплитудно-модулированного сигнала через такие фильтры боковые составляющие при условии симметричности фазовой характеристики фильтра сдвигаются по фазе относительно несущей частоты, в обе стороны одинаково.

Так как рабочие сигналы имеют фазовую модуляцию и, следовательно, некоторую девиацию частоты, обе боковые составляющие получат дополнительное фазовое смещение, которое будет одинаковым по величине и с разными знаками только при условии симметричности фазовой характеристики фильтров.

Использование однополупериодной демодуляции не создает возможности компенсации этих дополнительных фазовых сдвигов, так как однополупериодное выпрямление выделяет только одну (верхнюю или нижнюю) боковую составляющую. Следовательно, выходной сигнал с демодулятора будет иметь в этом случае дополнительные фазовые искажения, которые будут тем больше, чем больше девиация фазы и чем уже полоса пропускания полосовых фильтров.

При двухполупериодной демодуляции выпрямляются обе половины модулированного колебания и таким образом выделяются обе боковые составляющие. Так как последние имеют фазовые сдвиги, в идеальном случае равные (при полной симметрии фазовой характеристики фильтров) по величине и противоположные по знаку, то они компенсируются при сложении. Очевидно, что для этого необходимо записывать на ленту обе полосы передаваемого сигнала, что

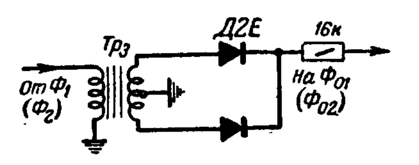


Рис. 11. Амплитудный демодулятор.

обеспечивается двухполупериодными модуляторами. С этой точки зрения выходная обмотка трансформатора $Тр_3$, через который демодуляторы согласуются с полосовыми фильтрами, должна иметь полную симметрию и средняя точка его должна быть заземлена. Поэтому трансформаторы $Тр_3$ собираются так же, как и трансформаторы $Тр_2$ амплитудных модуляторов.

Для согласования выходного сопротивления полосовых фильтров $Ф_1$ и $Ф_2$ с входным сопротивлением дроссельных фильтров $Ф_{01}$ и $Ф_{02}$, на которые работают демодуляторы, между ними ставится активное сопротивление, точное значение которого подбирается при наладке.

Оба диода *Д2Е* для полной компенсации фазовых искажений должны иметь одинаковые сопротивления как в прямом, так и в обратном направлениях. Особо важное значение имеет равенство сопротивлений и прямом направлении, так как в противном случае выпрямление будет несимметричным и фазовые искажения не будут полностью компенсироваться.

УСИЛИТЕЛИ РАБОЧИХ СИГНАЛОВ

С выхода демодуляторов сигналы, прошедшие через дроссельные фильтры низкой частоты, имеют сравнительно малую амплитуду, поэтому для нормальной работы фазовых дискриминаторов *ФД* эти сигналы должны быть усилены до величины порядка 15—20 *в*. Такое напряжение необходимо для получения нормальной крутизны характеристики *ФД*, которая должна быть порядка 0,2—0,5 *в* на градус рассогласования.

Для этой цели служат усилители напряжения $У_1$ и $У_2$ собранные на лампах *6Н1П* (рис. 12). Усилители должны иметь коэффи-

циент нелинейных искажений не более 2% по нечетным гармоникам и малый фон переменного тока. Эти требования обычно удовлетворяются введением отрицательной обратной связи, которая создается за счет катодных сопротивлений, не зашунтированных емкостями. Так как выходное сопротивление дроссельного фильтра, от которого работает усилитель, невелико и последний требует согласованной

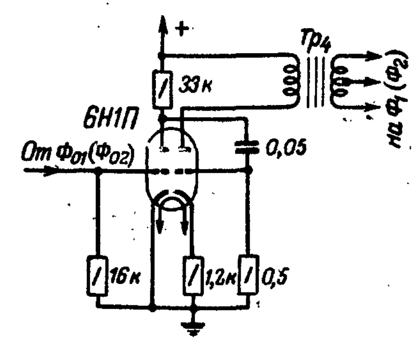


Рис. 12. Усилитель рабочего сигнала.

нагрузки, в сеточной цепи первого каскада стоит сопротивление небольшой величины. Выходной трансформатор второго каскада работает на фазовый дискриминатор, требующий симметричного входа. Для этой цели вторичная обмотка трансформатора имеет средний вывод, к которому при воспроизведении программы присоединяется выход фазовращателей $ПТ_1$ и $ПТ_2$. Несимметричность выхода фазового дискриминатора создает неблагоприятные условия работы следящего привода станка. Поэтому изготовление трансформатора $Тр_4$ должно быть таким же тщательным, как $Тр_2$ и $Тр_3$.

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Для правильной работы поворотных трансформаторов в режиме фазовращателей на частоте 400 *гц* требуется напряжение порядка 50—60 *в* и мощность около 2 *вт* для каждого *ПТ*. Так как на две координаты требуется два *ПТ*, общая мощность усилителей должна быть около 4 *вт*, а для трех координат 6 *вт*. Такую мощность обеспечивают усилители на лампах *6П14П*, включенных по двухтактной схеме. На рис. 13 показан только один усилитель, работающий на одно плечо *ПТ*. Второй такой же усилитель работает на другое плечо *ПТ*.

На вход усилителя подается одна из составляющих двухфазного напряжения, получаемого на выходе фазорасщепителя. Первый каскад усилителя собран на левой половине лампы *6Н2П* по схеме на сопротивлениях и работает в режиме усилителя напряжения. Второй, фазоинверсный каскад, собран на правой половине той же лампы. Выходной каскад собран по двухтактной схеме на лампах *6П14П*, для уменьшения нелинейных искажений он работает в ультралинейном режиме. Для эффективной работы усилители первичная обмотка трансформатора $Тр_5$ должна быть строго симметричной. Обе лампы *6П14П* должны иметь по возможности идентичные параметры и обеспечивать на первичной обмотке $Тр_5$ одинаковые напряжения. Для небольшой балансировки плеч выходного каскада в цепь катодов ламп включено переменное сопротивление.

Фазовая ошибка *ПТ* находится в прямой зависимости от неравенства подаваемых на него напряжений. Для стабильной работы усилителей при смене ламп и изменении нагрузки, а также для устра-

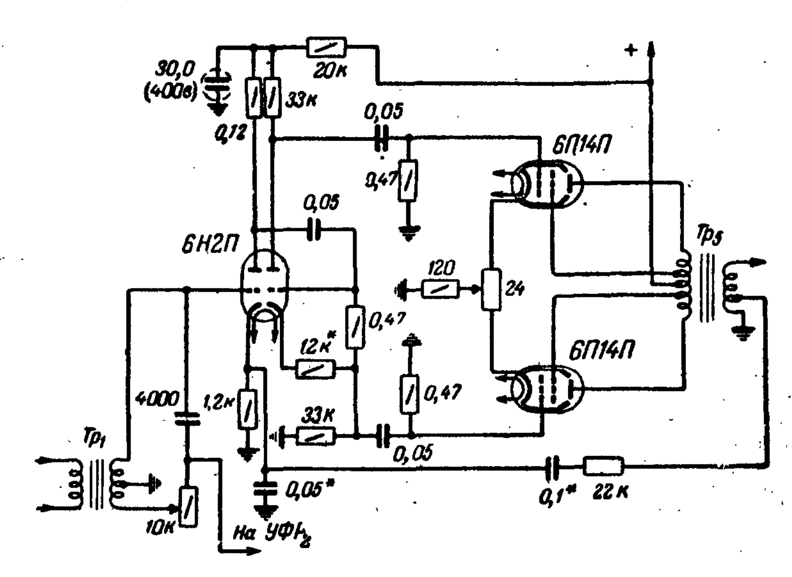


Рис. 13. Усилитель мощности для питания поворотных трансформаторов.

нения нелинейных искажений сигналов в усилителях применена глубокая отрицательная обратная связь по напряжению. Величины элементов цепи обратной связи зависят от параметров схемы, ламп и трансформаторов и поэтому подбираются при настройке. Окончательная отработка усилителей производится при работе всего устройства в нормальном режиме на номинальную нагрузку (с подключенными поворотными трансформаторами).

ФАЗОВЫЕ ДИСКРИМИНАТОРЫ

Для сравнения рабочего сигнала с сигналом отработки используются фазовые дискриминаторы, выдающие напряжение постоянного, точнее пульсирующего тока в зависимости от фазового рассогласования сигналов, подаваемых на их входы.

Рабочее напряжение, т. е. сигнал, промодулированный по фазе в соответствии с заданной программой, подается на дискриминатор через трансформатор $Тр_4$. Сигнал отработки подается на среднюю точку вторичной обмотки $Тр_4$ (рис. 14). Сигнал отработки получается на выходе фазовращателей, т. е. поворотных трансформаторов *ПТ*, при воспроизведении, когда они питаются сигналом эталонного канала. В зависимости от положения подач стола станка фаза сигналов отработки в общем случае будет отличаться от фазы рабочего сигнала на некоторый угол, т. е. будет иметь место некоторое рассогласование, в зависимости от которого на выходе дискриминаторов

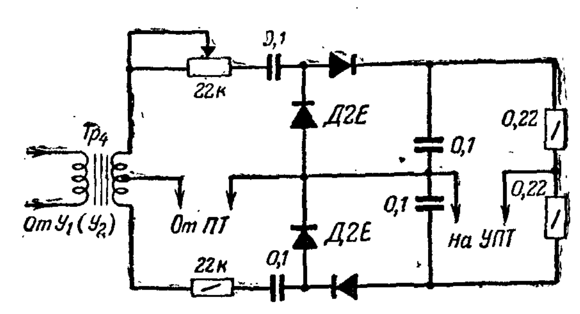


Рис. 14. Фазовый дискриминатор.

появится напряжение определенной величины и знака. Это напряжение сглаживается в фильтре, включенном на выходе дискриминаторов, и поступает на усилитель мощности постоянного тока *УПТ*.

Усиленное напряжение постоянного тока управляет двигателем привода подач стола станка, который приходит во вращение и перемещает стол до тех пор, пока не исчезнет фазовое рассогласование между рабочим сигналом и сигналом отработки. Так как в общем случае фаза рабочего сигнала изменяется непрерывно, то и стол ставка будет перемещаться непрерывно, «отслеживая» все изменения фазового рассогласования, стремясь его уменьшить до минимальной величины.

Такой режим работы называется программным управлением по положению в отличие от программного управления по времени, при котором величина перемещения зависит от времени действия управляющего сигнала.

Фазовые дискриминаторы собраны на полупроводниковых диодах типа Д2Е, включенных по схеме с удвоением напряжения. Цепочка, стоящая перед диодами, служит для того, чтобы дискриминатор был менее чувствителен к третьей гармонике подаваемых на него напряжений. Кроме того, перемещением движка переменного сопротивления можно в некоторых пределах компенсировать несимметричность выхода дискриминатора, так как диоды Д2Е имеют разброс по параметрам. При подаче на вход дискриминатора сдвинутых друг относительно друга на угол 90° рабочего и опорного сигналов на выходе его не будет постоянного напряжения. При рассогласовании на малый угол выходное напряжение дискриминатора

будет приблизительно пропорционально этому углу. Для нормальной работы усилителей постоянного тока *УПТ* фильтры дискриминаторов должны настраиваться так, чтобы величина пульсаций на частоте 400 *гц* на их выходе не превышала 10% от номинального значения входных напряжений.

УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Следящий привод стола станка требует большой мощности, поэтому сигнал постоянного тока на выходе дискриминаторов должен усиливаться до определенной величины, для чего используется усилитель постоянного тока *УПТ* (рис. 15). Первая лампа (*6Н1П*) работает в режиме дифференциального усилителя, что обеспечивает

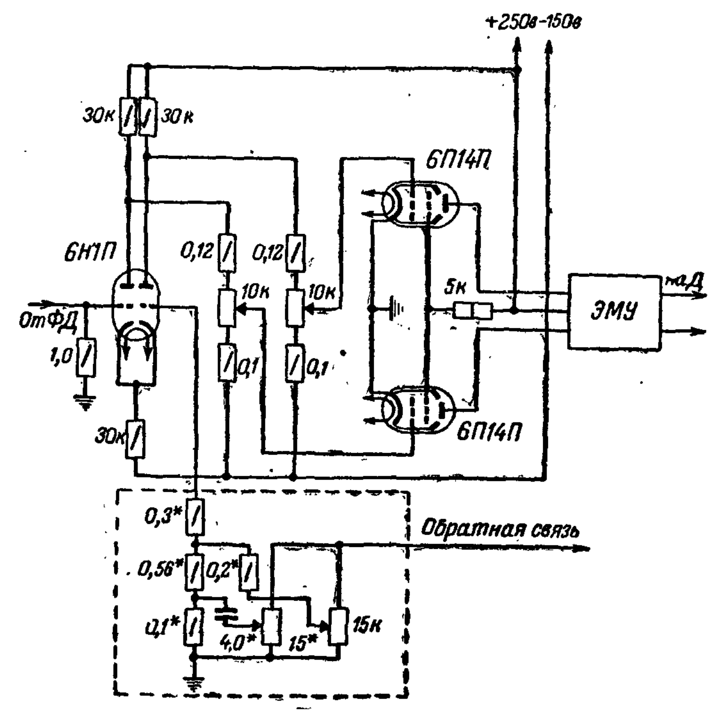


Рис. 15. Усилитель постоянного тока.

нормальную раскачку выходного каскада, собранного по двухтактной схеме. Симметричный выход *УПТ* необходим для подключения первичных обмоток электромашинного усилителя, от которого питаются исполнительные двигатели подач.

Выходной сигнал с дискриминатора подается на одну из сеток первой лампы, в то время как на другую сетку поступает сигнал об-

ратной связи через специальные корректирующие звенья, величины которых определяются типом привода и управляемого станка. Первые каскады *УПТ* имеют коэффициент усиления по напряжению порядка 10. Оконечный каскад *УПТ* собран на лампах *6П14П* и предназначен, в данном случае, для работы с электромашинным усилителем типа ЭМУ-12А. Для подключения следящего привода, построенного, например, на муфтах или тиратронах, в схеме должна быть изменена коммутация и в некоторых случаях изменен режим работы ламп. Общий коэффициент усиления *УПТ* равен 100. При рассогласовании на 1 *в* *УПТ* обеспечивает выходное напряжение порядка 100 *в* при мощности 15 *вт* на нагрузке 2 *ком*. Такой нагрузкой является первичная обмотка усилителя ЭМУ-12А.

Для стабильной работы усилителя требуется поддерживать напряжение питания на анодах и сетках ламп постоянным. Поэтому *УПТ* питается от стабилизированного источника напряжения +250 *в* и —150 *в* с коэффициентом стабилизации порядка 400 : 1.

По условиям работы следящей системы выход *УПТ* должен быть симметричен. Для получения равенства выходных напряжений на обмотках ЭМУ в схеме предусмотрена регулировка напряжений, подаваемых на сетки выходных ламп с дифференциального каскада.

Стабильность работы *УПТ* характеризуется дрейфом, т. е. уходом нуля при отсутствии сигнала на входе. Дрейф определяется нестабильностью питающих напряжений, уходом параметров ламп и отдельных элементов и колебаниями окружающей температуры. В нормальных условиях после предварительного 20-минутного прогрева за 2 *ч* работы дрейф должен быть не более 0,5 *в* в пересчете на вход усилителя.

ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Полосовые фильтры предназначены для разделения несущих рабочих сигналов и должны изготовляться и настраиваться с особой тщательностью, так как от них во многом зависит точность обработки деталей на станке. Полосовые фильтры должны создавать

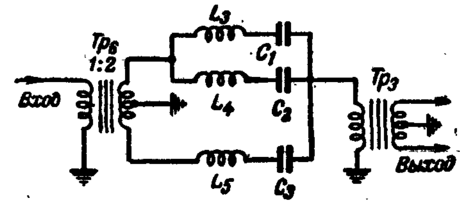


Рис. 16. Полосовой дифференциально-мостиковый шестиэлементный фильтр.

не только максимальное затухание на соседних частотах и пропускать с минимальными потерями сигнал своего канала, но и обеспечивать наименьшие фазовые искажения огибающей модулированной несущей.

Этим целям удовлетворяет полосовой дифференциально-мостиковый шестиэлементный фильтр, схема которого приведена на рис. 16.

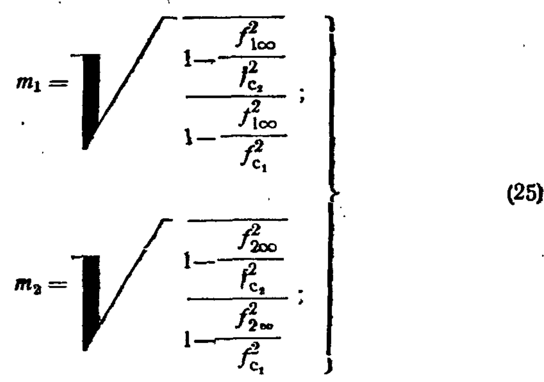
Такие фильтры при правильном выборе резонансных частот отдельных звеньев обеспечивают в полосе прозрачности прямолинейную фазовую характеристику и затухание на частотах соседних каналов до — 30 *дб*. Это затухание можно считать приемлемым для фазовых систем программного управления, так как помехи при этом создают фазовые искажения, допустимые с точки зрения точности обработки на фрезерных станках. Синусоидальная помеха на 30 *дб* меньшая основного сигнала дает ошибку порядка ±2°, что считается допустимым.

Для обеспечения прохождения модулированной несущей с двумя боковыми полосами при огибающей 400 *гц* полоса прозрачности фильтров должна быть не менее 1 000 *гц*. Для правильной работы дифференциально-мостиковых фильтров вход последних должен быть согласован с выходом предыдущих каскадов через трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 2. Только при этом условии дифференциально-мостиковые фильтры будут работать в нормальных условиях. Выходная обмотка трансформатора $Тр_6$ должна иметь строго симметричный выход, так как несимметрия создает фазовые искажения в полосе прозрачности и снижает затухание в полосе непрозрачности.

Точный расчет дифференциально-мостиковых фильтров трудоемок. При расчете надо исходить из наименьшего затухания фильтров в полосе прозрачности и наибольшего — в полосе непрозрачности. Для примерного расчета можно воспользоваться следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned}
C_1 &= \frac{f_{c2} - f_{c1}}{2\pi f_{c1} f_{c2} (m_1 + m_2)};\\
C_2 &= \frac{(f_{c2} - f_{c1})(m_1 + m_2)}{2\pi f_{c1} f_{c2} R (1 + m_1 m_2)};\\
C_3 &= \frac{(f_{c2} - f_{c1}) m_1 m_2}{2\pi f_{c1} f_{c2} R (m_1 + m_2)};\\
L_1 &= \frac{f_{c2} R (m_1 + m_2)}{2\pi f_{c1} (f_{c2} - f_{c1})};\\
L_2 &= \frac{(f^2_{c1} + m_1 m_2 f^2_{c2}) R}{2\pi f_{c1} f_{c2} (f_{c2} - f_{c1})(m_1 + m_2)};\\
L_3 &= \frac{R (m_1 + m_2) f_{c1}}{2\pi f_{c2} (f_{c2} - f_{c1}) m_1 m_2}.
\end{aligned}\right\} \quad (24)$$

В этих выражениях коэффициенты m_1 и m_2 определяются по частотам, на которых следует обеспечить наибольшее затухание, и равны



$$m_1 = \sqrt{\frac{1-\frac{f^2_{1\infty}}{f^2_{c_2}}}{1-\frac{f^2_{1\infty}}{f^2_{c_1}}}}; \quad m_2 = \sqrt{\frac{1-\frac{f^2_{2\infty}}{f^2_{c_2}}}{1-\frac{f^2_{2\infty}}{f^2_{c_1}}}}; \qquad (25)$$

При расчете рассматриваемого фильтра следует задаться частотами среза f_{c1} и f_{c2}, определяющими максимальную полосу прозрачности фильтра, и величиной сопротивления R, исходя из того, какая нагрузка включается на входе и выходе фильтра. Следует отметить, что с увеличением R увеличивается индуктивность элементов фильтра и поэтому катушки могут получиться большими по размерам. Для того чтобы катушки индуктивностей были не очень большими, величину сопротивления надо выбирать в пределах 500 *ом* — 2 *ком*. Емкости конденсаторов фильтра, показанного на рис. 16, имеют следующие величины: C_1 — 680 *пф*; C_2 — 1 000 *пф*; C_3 — 9 500 *пф* (для f=2 100 *гц*); C_1 — 1 000 *пф*; C_2 — 1 500 *пф*; C_3 — 1 100 *пф* (для f=4 900 *гц*).

Для улучшения согласования с нагрузкой рекомендуется рассчитывать фильтр на номинальное характеристическое сопротивление. С точки зрения получения равномерности полосы прозрачности номинальное сопротивление должно быть равно:

$$R = \frac{4}{\pi} R_н. \qquad (26)$$

В то же время с точки зрения получения прямолинейной фазовой характеристики должно быть

$$R = R_н, \qquad (27)$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки.

В данном случае целесообразнее придерживаться последнего требования, так как для фазовых систем важнее получить наименьшие фазовые искажения, чем равномерность полосы прозрачности по затуханию.

Величина потерь в элементах фильтра гораздо больше сказывается на затухании в полосе непрозрачности, чем на фазовой характеристике, поэтому слишком жестких требований к добротности элементов предъявлять не следует. Добротность катушек индуктивности как элементов, активные потери в которых всегда больше, чем потери в емкостных элементах, должна быть порядка 50—100. Если добротность катушек будет ниже, то затухание на частотах соседних каналов окажется недостаточным. Для создания необходимого затухания в этом случае придется либо увеличивать число элементов фильтра, либо разносить несущие частоты каналов. Восьмиэлементные дифференциально-мостиковые фильтры обеспечивают большее затухание в полосе непрозрачности, но гораздо сложнее в настройке.

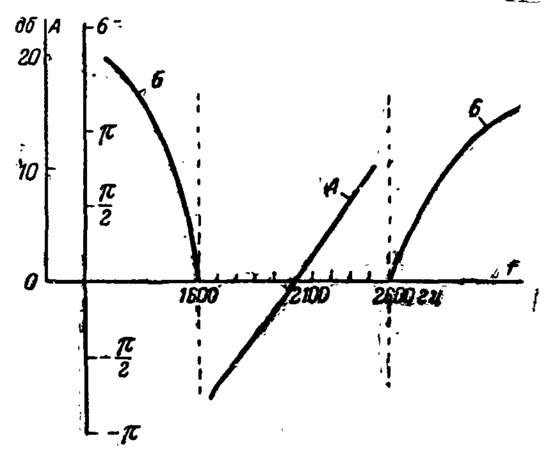


Рис. 17. Характеристики затухания и фазы идеального полосового дифференциально-мостикового шестиэлементного фильтра

А — фазовая характеристика в полосе прозрачности; *Б* — кривая затухания в полосе непрозрачности.

Типовые характеристики шестиэлементных дифференциально-мостиковых фильтров, используемых в системе, приведены на рис. 17. Эти характеристики построены по расчетным данным для идеального случая (фильтр без потерь и согласован с нагрузкой). Рабочие характеристики фильтров снимаются при работе системы с магнитной лентой и методика их измерения будет приведена в дальнейшем.

ФИЛЬТРЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Для отфильтровывания эталонного сигнала из суммы воспроизводимых частот и выделения огибающих из демодулированных несущих в системе используются дроссельные фильтры низкой частоты (рис. 18). Все они имеют одинаковые параметры, так как должны пропускать только низкие частоты до 500 *гц* и не пропускать высокие частоты (свыше 500 *гц*). На рис. 19 приведены построен-

ные расчетным путем характеристики фильтра (фильтр без потерь и согласован с нагрузкой). Реальные фильтры будут иметь кривую затухания в полосе непрозрачности несколько ниже идеальной, в то время как фазовая характеристика фильтра с малыми потерями мало отличается от идеальной.

Фильтры низкой частоты будут создавать фазовые искажения из-за нелинейности фазовой характеристики и конечной величины

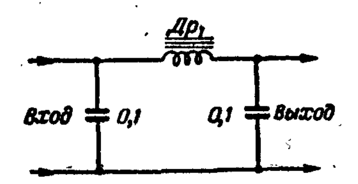


Рис. 18. Дроссельный низкочастотный фильтр.

затухания в полосе непрозрачности. Последнее связано с тем, что благодаря конечному затуханию в канал эталонного сигнала попадут помехи от соседних рабочих сигналов, которые создадут паразитные фазовые сдвиги колебаний эталонной частоты. Для устра-

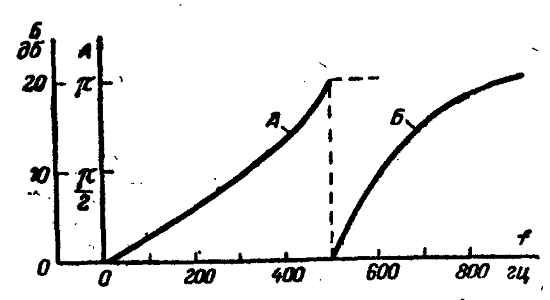


Рис. 19. Характеристики затухания и фазы дроссельного низкочастотного фильтра.

А — фазовая характеристика в полосе прозрачности; *Б* — кривая затухания в полосе непрозрачности.

нения недопустимых фазовых искажений помехи должны иметь уровень минимум на 30 *дб* ниже уровня полезного сигнала.

Благодаря тому что фильтры имеют фазовую характеристику, имеющую некоторый наклон в полосе пропускания, отклонения эталонной к рабочих частот от номинальных значений будут вызывать фазовые искажения. При одинаковых фильтрах демодуляторов и эталонного сигнала искажения, вызываемые одновременными колебаниями частот, идущих с магнитной ленты, очевидно, будут одинаковыми и должны скомпенсироваться. В этом случае останутся только те искажения, которые связаны с девиацией рабочих частот при записи программы. При правильном согласовании фильтров с нагрузкой, т. е. при номинальном характеристическом сопротивлении фильтра, равном активному сопротивлению нагрузки, эти искажения не превышают 1° на 5 *гц* девиации.

Требуемые величины индуктивности (в генри) и емкости (в фарадах) фильтра подсчитываются по формулам:

$$L = \frac{2R}{\omega_c} = \frac{R}{\pi f_c}; \qquad (28)$$

$$C = \frac{L}{R^2} = \frac{1}{\pi f_c R}. \qquad (29)$$

В этих формулах величина R является номинальным характеристическим (волновым) сопротивлением фильтра.

Сигнал, прошедший через фильтр эталонной частоты, поступает на фазорасщепитель через трансформатор $Тр_1$. Фильтры демодуляторов связаны непосредственно с усилителями рабочих сигналов.

СМЕСИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

Для смешивания сигналов при записи на магнитную ленту в системе используется линейный смеситель, собранный на активных сопротивлениях (рис. 6). Однако в некоторых случаях такой смеситель

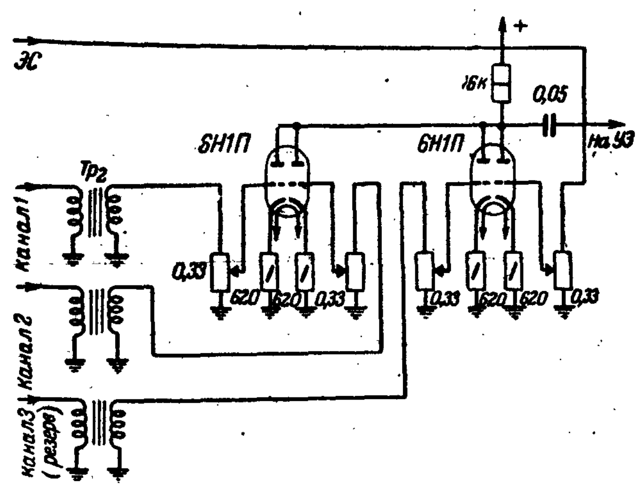


Рис. 20. Усилитель-смеситель записи сигналов.

может нарушить работу модуляторов. Для предотвращения этого можно использовать более высокоомный смеситель, собранный на электронных лампах.

Схема смесители на лампах приведена на рис. 20. Здесь $Тр_2$ являются трансформаторами модуляторов, от которых сигналы подаются на отдельные сетки электронных ламп. Эталонный сигнал *ЭС*, идущий от выходной обмотки трансформатора $Тр_1$, подается через переменное сопротивление также на отдельную сетку. Очевидно, что при использовании подобной схемы все каналы оказываются развязанными друг относительно друга, что благоприятно сказывается на работе модуляторов. Аноды всех ламп соединены параллельно и имеют общую нагрузку, с которой сигналы через разделительный конденсатор подаются на усилитель записи магнитофона.

Для линейного суммирования подводимых на смеситель сигналов режим работы электронных ламп следует тщательно подобрать. Все лампы смесителя должны работать только на линейных участках характеристик. В противном случае на выходе смесителя появятся не только нелинейные искажения, но и перекрестная модуляция сигналов одного канала сигналами других, что создаст такие помехи, которые не будут отфильтрованы при воспроизведении и дадут фазовые погрешности. Для регулирования уровня смешиваемых сигналов напряжение последних подводится к сеткам смесителя через переменные сопротивления.

КАСКАДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

Для предотвращения шунтирования разделительных фильтров при воспроизведении, что сильно ухудшает их избирательные свойства, в частотном блоке (рис. 6) вместо делителя на сопротивлениях может быть использован делитель, собранный на электронных лампах (рис. 21).

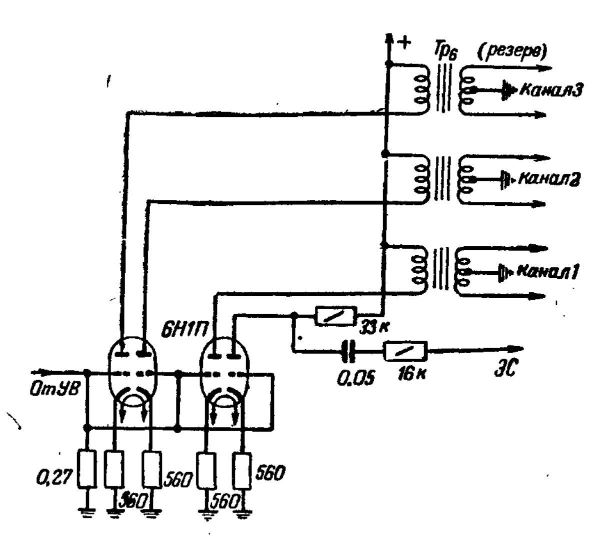


Рис. 21. Схема разделения сигналов воспроизведения.

Выход усилителя воспроизведения магнитофона в этом случае подсоединяется к сеточным цепям ламп *6Н1П*. Анодные цепи каждой лампы нагружены на свои фильтры несущих частот $Ф_1$, $Ф_2$ и на фильтр эталонного сигнала $Ф_0$. Фильтры несущих частот согласуются с выходом каскада разделения через трансформаторы $Тр_6$, которые показаны на принципиальной схеме. Первичные обмотки трансформаторов включены непосредственно в анодные цепи ламп делителя, поэтому через них протекает постоянная составляющая анодных токов, что нежелательно. Фильтр эталонного сигнала связан с анодом одной из ламп через согласующее сопротивление и переходную емкость, поэтому дроссель фильтра работает в более благоприятном режиме, так как через него не протекает постоянная составляющая анодного тока, но избирательные свойства его несколько ухудшены, поскольку он шунтируется анодной нагрузкой лампы делителя.

Применение электронного делителя позволяет несколько улучшить режим работы полосовых фильтров и, кроме того, в нем происходит усиление приходящих сигналов с *УВ*. Такой делитель имеет те же недостатки (возможность нелинейных искажений и перекрестной модуляции), которые присущи электронному смесителю.

ФАЗОРАСЩЕПИТЕЛЬ

Фазорасщепитель предназначен для преобразования подводимого к нему однофазного напряжения в двухфазное, которое требуется для работы поворотных трансформаторов в режиме фазовращателей.

Фазорасщепитель частотного блока показан на общей принципиальной схеме рис. 6. Он состоит из цепочки *RC* и работает как при записи, так и при воспроизведении от $Тр_1$, имеющего на выходной обмотке среднюю точку. Двухфазное напряжение снимается для одного усилителя ($УФР_2$) со всей цепочки, а для другого ($УФР_1$) — с сопротивления. Фазорасщепитель не должен быть низкоомным, чтобы не нарушать работу фильтра эталонного сигнала $Ф_0$ при воспроизведении, и не должен быть очень высокоомным для того, чтобы его работа не нарушалась входными цепями усилителей *УФР*.

Угол между составляющими двухфазного напряжения для фазорасщепителя может быть подсчитан по формуле

$$\alpha = 2 \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{\omega C R}. \qquad (30)$$

Для сдвига фаз на угол 90° требуется выполнить условие $\omega CR = 1$. В формуле ω является частотой эталонного генератора при записи и частотой эталонного сигнала при воспроизведении.

Любое отклонение частоты ω от номинала нарушит ортогональность расщепительных составляющих и вызовет фазовую ошибку на выходе фазорасщепителей. Для того чтобы она была минимальной, колебания частоты эталонного генератора не должны быть более 0,5%. Фазовые искажения при воспроизведении возникают из-за колебаний частоты эталонного сигнала, вызываемых нестабильностью скорости движения ленты и несимметрией направляющих и ведущего

роликов, поэтому лентопротяжный механизм должен быть высокого качества. Совершенно очевидно также, что скорости движения магнитной ленты при записи и воспроизведении должны быть равны. Лентопротяжный механизм магнитофона в достаточной степени удовлетворяет отмеченным требованиям и может применяться без дополнительных переделок.

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ МАГНИТОФОНА МЭЗ-15

Так как магнитофон МЭЗ-15 подробно описывается в прилагаемой к нему инструкции, то здесь приводятся лишь те его технические данные, которыми необходимо руководствоваться при построении системы программного управления. Носитель записи — магнитную ленту — можно использовать типа 1. Скорость движения ленты 762 *мм/сек* (без насадки на валу ведущего двигателя — 381 *мм/сек*), время проигрывания 22 *мин* при скорости 762 *мм/сек*, максимальная длина магнитной ленты 1 000 *м*, время перемотки полного рулона 3 *мин*.; детонация, обусловленная неравномерностью движения магнитной ленты, не более 0,2% на частоте 3 000 *гц*.

Частотная характеристика сквозного тракта запись — воспроизведение имеет неравномерность 3 *дб* в полосе 30 — 10 000 *гц* и в остальной части диапазона 5 *дб*, нелинейные искажения при максимальном уровне записи на частоте 400 *гц* не превышают 3% (при удвоенном токе подмагничивания), уровень шумов сквозного тракта на 60 *дб* ниже нормального выходного уровня при максимальном токе записи. Частота тока стирания и подмагничивания 80 *кгц* ±5%. Ток стирания не менее 55 *ма*, ток подмагничивании плавно регулируется до 18 *ма*.

Магнитофон обеспечивает нормальную работу при температуре окружающей среды 20 ± 5° С и относительной влажности не выше 65%. Электропитание — однофазная сеть переменного тока частотой 50 *гц*, напряжением 220 *в* — 10% ± 5%. Потребляемая от сети мощность не более 300 *ва*. Вес — не более 180 *кг*.

Конструктивно аппарат оформлен в виде металлической консоли с откидной застекленной крышкой и съемной передней дверцей. Размеры консоли в закрытом состоянии 848×550×990 *мм*.

Внутри консоли на верхней полке устанавливается лентопротяжный механизм, а на нижней полке слева — усилитель записи с генератором стирания и подмагничивания, а справа — усилитель воспроизведения. Все соединения блоков (усилителей и лентопротяжного механизма) с остальной схемой устройства производятся с помощью контактных разъемов.

Самозапускающийся синхронно-реактивный конденсаторный двигатель ДВС 10/5-4 является ведущим лентопротяжного механизма, асинхронные конденсаторные двигатели ДПА 10/5-4 являются перематывающими.

Блок магнитных головок съемный. В общем литом корпусе магнитные головки располагаются в направлении движения ленты в следующем порядке: стирающая, записывающая, воспроизводящая. Стирающая головка имеет медный экран и, кроме того, заключена вместе с записывающей головкой в общий экран из пермаллоя. Головка воспроизведения помещена в трехслойный экран из пермаллоя.

На верхней панели консоли находятся кнопки управления работой магнитофона и индикатор уровня воспроизводимого сигнала.

Усилители записи и воспроизведения имеют автономные выпрямители и отдельные выключатели питания. В усилителях предусмотрена регулировка уровней сигналов, и, кроме того, на шасси усилителей выведены ручки для коррекции частотной характеристики.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ

Настройка отдельных элементов частотного блока не представляет особых трудностей, так как большинство приведенных схем знакомо квалифицированным радиолюбителям. Требования к формам напряжений рабочего и эталонного сигналов, а также к стабильности частоты генераторов были изложены выше.

Отметим некоторые особенности настройки усилителей мощности, питающих поворотные трансформаторы. Для того чтобы поворотные трансформаторы работали в режиме фазовращении, на них необходимо подавать двухфазное напряжение порядка 50 *в* частоты 400 *гц*. После расчета цепочки *RC* фазорасщепителя и сборки усилителей мощности следует проверить сдвиг фаз между отдельными составляющими непосредственно на входных зажимах *ПТ*.

Для этого с одной статорной обмотки *ПТ* напряжение должно подаваться на вертикальные пластины осциллографа (например ЭО-7), а с другой — на горизонтальные пластины. На экране осциллографа должна появиться фигура Лиссажу, которая при сдвиге составляющих точно на угол 90° будет представлять собой правильный круг. Так как получить фазовые сдвиги в двух усилителях *УФР* одинаковыми по величине практически невозможно, то в общем случае правильный круг не получится. В этом случае, для того чтобы получить нужный сдвиг на 90°, следует подрегулировать движок переменного сопротивлении фазорасщепителя с таким расчетом, чтобы фигура стала похожей либо на круг, либо на эллипс, вытянутый вдоль горизонтальной или вертикальной оси. Если удастся сразу получить круг, то на этом настройку можно кончить. Если же на экране осциллографа получается эллипс, то это означает, что напряжения на обмотках *ПТ* неравны. Для уравнения их следует изменить усиление одного из усилителей до получения круга. Такая настройка практически достаточна.

Перед установкой в частотный блок полосовых и низкочастотных фильтров у них следует проверить полосу прозрачности и фазовую характеристику. Если полосовые фильтры не обеспечивают симметрию фазовой характеристики и имеют малое затухание (менее 30 *дб*), на частотах соседних каналов их следует пересчитать, либо собрать на других элементах с большей добротностью, или добавить к ним еще одно звено *LC*. Так же следует поступить и с фильтрами низкой частоты.

Все усилители следует собрать с соблюдением правил, предъявляемых к высококачественным электронным схемам. Монтаж всех узлов должен обеспечивать минимум наводок от соседних каналов и от сети. Цепи накала всех ламп необходимо вести отдельными проводами, ни в коем случае не используя в качестве второго провода шасси блока.

Катодные цепи входных ламп нужно заземлить непосредственно у цоколи лампы по минимуму фона на выходе усилителей. К этой же

точке следует подвести все земляные концы сопротивлений и конденсаторов первого каскада усилителя. Выводы от элементов к тумблерам управления и магнитным головкам должны вестись двумя проводами в металлической оплетке. Нельзя использовать в качестве токоносителя шасси частотного блока.

В остальном настройка блока ничем не отличается от настройки элементов высококачественного воспроизведения, методы которой широко известны.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Амплитудно-частотная характеристика определяет способность устройства воспроизводить и разделять между собой все сигналы (эталонный и рабочие), записанные на магнитной ленте. Для снятия характеристики нужно записать через усилитель записи на магнитную ленту спектр частот от 30 до 10 000 *гц* с таким расчетом, чтобы

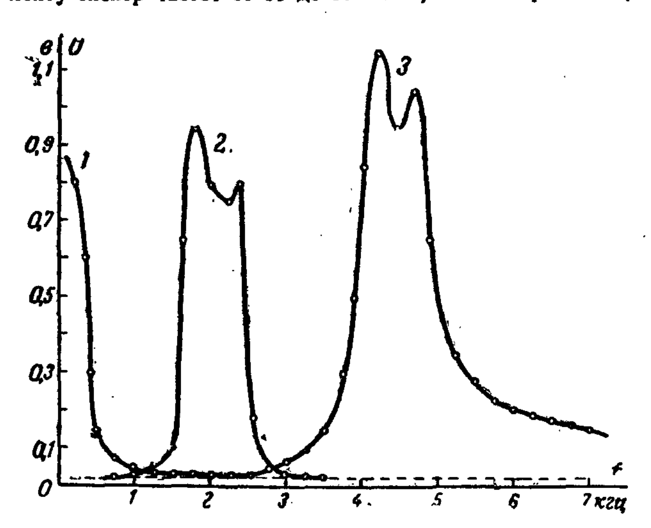


Рис. 22. Амплитудно-частотные характеристики устройства.

1 — канал ЭС; *2* — канал I; *3* — канал 2.

на каждой частоте можно было при воспроизведении измерить сигналы на выходе фильтров. Для этого надо записывать каждую частоту в течение 1—2 *мин*. Примерный вид амплитудно-частотной характеристики приведен на рис. 22. Она показывает способность системы разделять между собой все записанные сигналы и одновременно величину помехи от соседних каналов в рабочем режиме. По

этой характеристике можно выяснить, как и с какой точностью можно воспроизводить записанную программу при наличии перекрестных помех.

Как уже отмечалось, для удовлетворительной точности работы уровень основного сигнала должен превышать уровень помехи от соседних каналов на + 30 *дб*. Если это условие не будет выполнено, устройство даст недопустимую погрешность при обработке. Поэтому, если после анализа амплитудно-частотной характеристики выяснится, что затухание ниже отмеченной нормы, необходимо установить причину этого и устранить недостатки в схеме. Затухание ниже нормы может быть связано либо с неправильным режимом записи (большие токи записи и низкий уровень тока подмагничивания), либо с неправильной работой смесителя и каскадов разделения, о которых говорилось ранее, либо с плохой настройкой фильтров и несогласованностью их с нагрузкой, в результате чего могли снизиться их избирательные свойства.

ФАЗО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Фазо-частотная характеристика снимается несколько иначе, так как при этом важно знать фазовые сдвиги при относительно небольших отклонениях записываемых частот от номинальных значений. Фазо-частотная характеристика показывает зависимость фазового сдвига от изменения рабочих и эталонных частот.

Для ее снятия надо записать на магнитную ленту так же, как и при снятии амплитудно-частотной характеристики, колебания разных частот, лежащих по обе стороны от номинальной частоты. Так

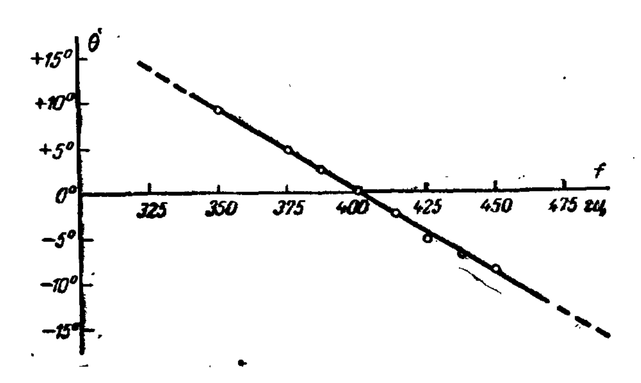


Рис. 23. Фазо-частотная характеристика.

как в данной системе номинальная частота равна 400 *гц*, то следует записать сигналы длительностью 1—2 *мин* с частотами от 300 до 500 *гц* через равные интервалы. При воспроизведении нужно подключить к выходам дискриминаторов каждого канала вольтметры постоянного тока, точка отсчета показаний которых должна выбираться при воспроизведении номинальной частоты 400 *гц*.

Вследствие того что в системе запись — воспроизведение имеются некоторые постоянные фазовые сдвиги, нули показаний вольтметра будут соответствовать положениям роторов поворотных трансформаторов, не совпадающих между собой на отдельных каналах. Роторы *ПТ* поворачивают до тех пор, пока не установятся нули на выходе дискриминаторов, это положение принимается за фазовый сдвиг, равный относительному нулю. При воспроизведении сигналов, имеющих частоты, отличные от номинальной, на выходе дискриминаторов появится напряжение постоянного тока того или другого знака, в зависимости от того, в какую сторону от номинальной отклоняются воспроизводимые частоты. Вращая поворотные трансформаторы на некоторый угол, следует добиться нуля на выходе *ПТ*. После этого угол поворота отсчитывается от того положения *ПТ*, которое было принято условно за нуль на частоте 400 *гц*. Для измерения углов поворота на роторе *ПТ* должен быть укреплен лимб с делениями не более чем через один градус.

После того как будут произведены измерения фазовых сдвигов на обоих каналах, надо построить график фазо-частотной характеристики. Типовая характеристика одного из каналов системы приведена на рис. 23. Здесь по оси абсцисс отложены частоты по обе стороны от номинальной, а по оси ординат — фазовые сдвиги в градусах. За нуль фазового сдвига принят сдвиг на номинальной частоте 400 *гц*.

Как следует из характеристики при частотах бо́льших номинальной, имеется некоторое запаздывание по фазе, при частотах меньших номинальной, — опережение. Это распределение необязательно, и может получиться так, что запаздывание и опережение поменяются местами. При изменениях номинальной частоты на ±10% фазовый сдвиг не должен превышать ±10°.

КРУТИЗНА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Крутизна преобразования характеризует зависимость величины постоянного тока на выходе дискриминатора от фазового рассогласования подаваемых на его вход сигналов.

Для экспериментального определения характеристики преобразования надо записать на магнитную ленту ряд сигналов, соответствующих последовательным статическим положениям поворотных трансформаторов с интервалом 0,5—1° и затем при воспроизведении измерить выходное напряжение фазового дискриминатора в зависимости от угла поворота *ПТ*.

Можно сделать иначе, т. е. записать на всю длину ленты сигнал для одного положения *ПТ*, а напряжение измерять при вращении *ПТ* при воспроизведении. Этим способом можно снять характеристику несколько точнее.

Наилучшие результаты по точности измерения характеристики можно получить, подавая сигналы на вход *ПТ* не от магнитной ленты, а от генератора *ЗГ-10*, причем эти напряжения следует сделать точно такими же, какими они будут при воспроизведении с ленты. В этом случае сигналы, идущие на *ФД*, являются более стабильными по частоте и амплитуде, и выходное напряжение *ПТ* не будет содержать посторонних колебаний.

Типовая характеристика преобразователя приведена на рис. 24. Здесь по оси абсцисс отложен угол фазового рассогласования в градусах, а по оси ординат выходное напряжение *ФД* в вольтах при напряжениях входных сигналов, равных 30 *в*.

Как следует из приведенной кривой до рассогласования порядка 10° (рассогласование при работе следящей системы обычно не превышает этой величины), характеристика преобразования практически является линейной и симметричной. Если она получится нелинейной

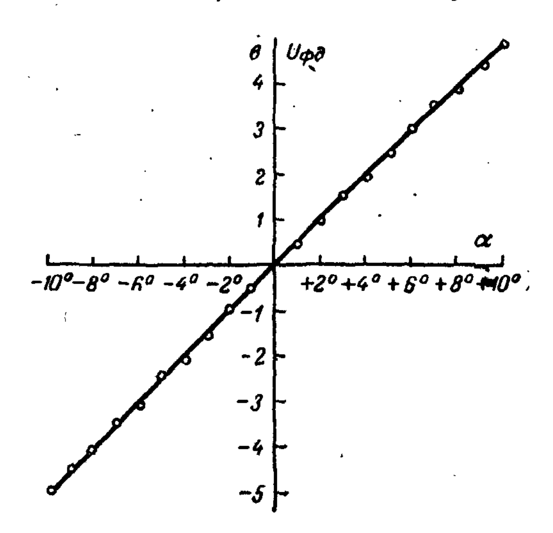


Рис. 24. Крутизна преобразования.

и несимметричной, следует изменить режим работы элементов фазового дискриминатора (подобрать диоды, сопротивления, проверить выходные обмотки $Тр_4$).

АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Амплитудная характеристика усилителя постоянного тока (*УПТ*) определяет динамический диапазон системы.

Она представляет собой зависимость выходного напряжения усилителя от напряжения на его входе. Зная амплитудную характеристику, можно подобрать такой режим усилителя, при котором сигнал с входа *УПТ* будет проходить на его выход без амплитудных искажений. Для нормальной работы *УПТ* пульсация выпрямленного напряжения с выхода дискриминатора не должна превышать 5 *в*.

Амплитудная характеристика *УПТ* снимается в режиме записи от делителя напряжений. Последний показан на рис. 6 и представляет собой обычное переменное сопротивление, включенное между точками +250 и —150 *в* таким образом, чтобы при некотором положении движка потенциометра, присоединенного ко входу *УПТ*, на выходе последнего не было напряжения постоянного тока. С этой

точки начинают снимать амплитудную характеристику, меняя напряжение на уставке от относительного нуля в обе стороны до 5 *в*. Затем строится амплитудная характеристика (рис. 25), для чего по

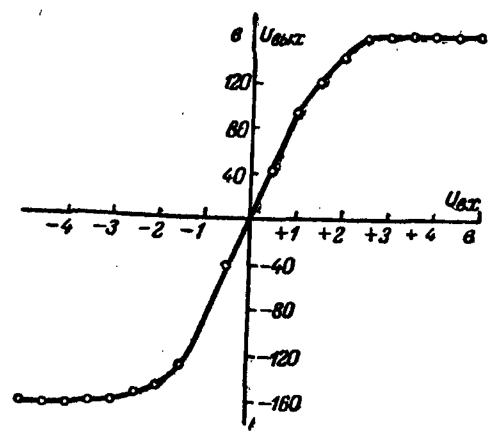


Рис. 25. Амплитудная характеристика.

оси абсцисс откладывается входное напряжение, а по оси ординат — выходное. Как видно из приведенного рисунка, амплитудная характеристика прямолинейна при входных напряжениях до ±2,5 *в*.

ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Главной характеристикой устройства является точность передачи программы на вход следящего привода станка. Ошибка передачи программы от магнитной ленты до выхода фазового дискриминатора составляет примерно $^1/_3$ общей ошибки при обработке деталей на станке.

Точность передачи программы на вход следящего привода зависит от фазовых погрешностей. К этим погрешностям в первую очередь относятся ошибки поворотного трансформатора, обусловленные неравенством и неортогональностью питающих напряжений, ошибка фазорасщепителя, фазовые искажения, зависящие от помех синусоидальной формы и шумов, фазовые ошибки от перекрестной модуляции и нелинейных искажений сигналов, возникающих при магнитной записи, а также колебания фазы воспроизводимых сигналов, вызванные перекосом щелей магнитных головок и перекосом и несимметрией ведущего и направляющих роликов.

Отличие фазового угла между питающими напряжениями от угла 90° (неортогональность питающих напряжений) непосредственно влияет на фазу выходного напряжения, поэтому точность установки фазорасщепителя должна быть в пределах ±0,5°.

Фазорасщепитель дает ошибку при колебаниях частоты воспроизводимого с ленты эталонного сигнала. Эти колебания зависят в основном от детонации лентопротяжного механизма и нестабильности работы генератора эталонного сигнала. Величина детонации лентопротяжного механизма и нестабильность генератора эталонного сигнала не должны превышать ±0,5%.

Синусоидальные помехи от соседних каналов возникают при недостаточных избирательных свойствах полосовых фильтров рабочих сигналов и плохого качества фильтра эталонного сигнала. Предельно допустимой нормой отношения сигнал — помеха можно считать —30 *дб*.

Фазовые искажения от внутренних помех обусловлены в основном шумами тракта магнитной записи и усилителей воспроизведения. В нормальных условиях отношение сигнал—шум на всех каналах на входе дискриминатора не должно быть менее 40 *дб*.

Перекрестная модуляция, как уже отмечалось ранее, обусловлена нелинейным режимом смесительного и разделительного каскадов. Явление перекрестной модуляции хорошо известно в радиотехнике и состоит в амплитудной модуляции сигнала одного канала

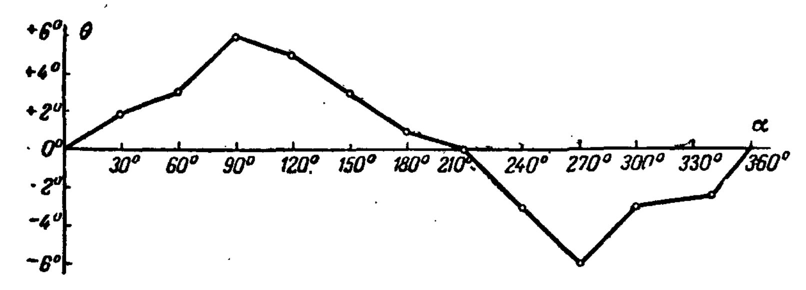


Рис. 26. Характеристика точности воспроизведения.

сигналами других каналов. При частотном разделении каналов на магнитной ленте возникает дополнительная перекрестная модуляция, обусловленная нелинейной зависимостью остаточного магнитного потока ленты от тока записи.

Суммарная помеха от перекрестной модуляции может быть измерена на выходе каждого рабочего канала при записи немодулированных несущих. Измерив напряжение помехи на выходе низкочастотных фильтров и зная величину полезного сигнала, получающегося при записи модулированной несущей, можно подсчитать фазовые искажения от перекрестной модуляции. Помеха от перекрестной модуляции должна быть на 30 *дб* ниже основного сигнала.

Нелинейные искажения сигналов создают фазовую погрешность в поворотных трансформаторах и фазовом дискриминаторе. Нормально допустимая величина нелинейных искажений, измеренная на входе *ПТ*, не должна превышать 2,5%.

Перекос щелей головок и роликов создают помехи при колебаниях записываемых частот. Лентопротяжный механизм магнитофона МЭЗ-15 полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к точности изготовления этих элементов в системах программного управления с частотным разделением каналов.

Зная причины фазовых искажений, можно проанализировать кривую точности воспроизведения программы. Эта кривая снимается путем записи на ленту статических положений *ПТ* через интер-

валы 15° длительностью 1—2 *мин*, а затем воспроизведения записанных сигналов с измерением выхода дискриминаторов каждого канала. Для измерения фазовых сдвигов воспроизводимых сигналов в каждом интервале путем вращения ротора *ПТ* добиваются нуля постоянного тока на выходе дискриминаторов.

Разница между положением ротора *ПТ* при записи и воспроизведении составляет фазовую ошибку.

На рис. 26 приведена типовая характеристика точности воспроизведения, снятая экспериментально для одного из рабочих каналов. Максимальный разброс между минимумом и максимумом приведенной кривой не должен превышать для частотного разделения каналов 12° (±6°).

КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА

Внутри корпуса магнитофона на специальных направляющих установлен частотный блок, управление работой которого производится с панели магнитофона при помощи шести тумблеров. Слева от лентопротяжного механизма расположены тумблеры переключения режима работы всех каналов ($П_9$, $П_1$ и $П_2$), справа — тумблеры анодного питания ($П_3$ — общий для подачи +250 *в*, $П_4$ — переключатель «запись — воспроизведение», $П_5$ — включение стабилизированных напряжений +250 *в* и —150 *в*). При помощи этих переключателей производится управление работой только одного частотного блока, сам станок имеет собственный пульт управления.

Частотный блок присоединяется к магнитофону с помощью двух разъемов, что обеспечивает быстрый и удобный монтаж системы. Распределение лепестков разъемов между электронными узлами должно быть выполнено так, чтобы входные и выходные цепи усилителей не располагались рядом, а силовые линии не проходили вблизи цепей, несущих малые токи.

На рис. 27 приведен общий вид частотного блока. Здесь видны цилиндрические экраны, внутри которых смонтированы полосовые разделительные фильтры (один из них — резервный для третьего рабочего канала) и три трансформатора ($Тр_4$) дискриминаторов, один из которых также резервный. Справа расположен специальный разъем для выхода усилителей постоянного тока.

На рис. 28 показан вид частотного блока со стороны монтажа, который произведен таким образом, чтобы каждому каналу отводился по возможности изолированный отсек.

Первый (слева) отсек — резервный и предназначен для дополнительного, третьего, канала. Во втором и третьем отсеках расположены все элементы, относящиеся к преобразованию сигналов для продольной и поперечной подач. В них смонтированы (в каждом отсеке) генераторы несущих частот, модуляторы, полосовые разделительные фильтры, демодуляторы, фильтры низкой частоты, усилители рабочих сигналов и фазовые дискриминаторы. Строгого порядка расположения элементов рекомендовать нельзя, но общие законы расстановки деталей, принятые в радиосхемах, должны быть выдержаны. Небольшой отсек в левом нижнем углу предназначен для смесительных каскадов, отсек в нижней части второго канала использован под каскады разделения сигналов, а в отсеке первого канала (в верхней части) смонтирован генератор эталонного сигнала с буферным каскадом. Крайние правые отсеки (нижний и большой верхний) предназначены соответственно для усилителей мощности поворотных трансформаторов и усилителей постоянного тока. Все силовые провода подведены к правому разъему блока, а все провода, несущие малые токи, — к левому.

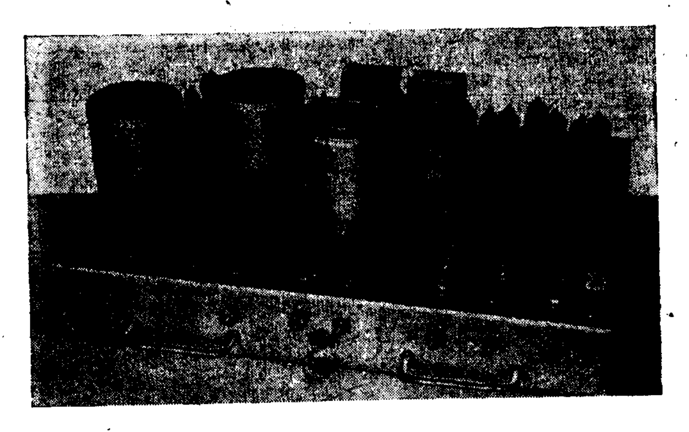


Рис. 27. Общий вид частотного блока.

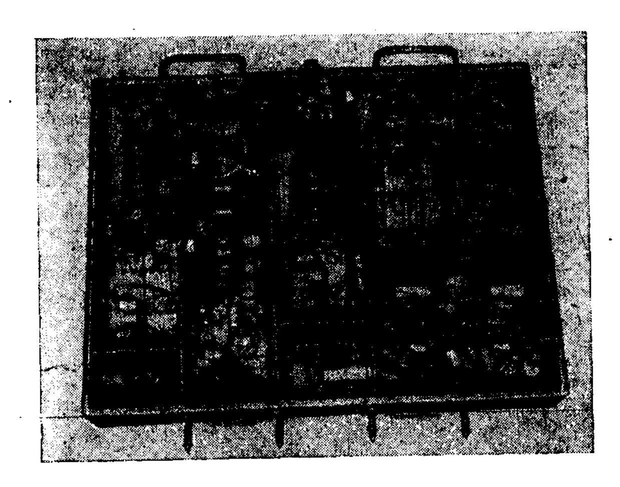


Рис. 28. Частотный блок со стороны монтажа.

Монтаж внутри магнитофона от контактных разъемов частотного блока и от коммутирующих переключателей сделан в основном двухжильными экранированными проводами. Выход *СПУ* на управле-

мый станок и подача питания на частотный блок осуществлены через два отдельных разъема, укрепленных на задней стенке магнитофона. Подача управляющих сигналов на ЭМУ-12А и на датчики положения, укреплённые на столе станка, производится с помощью многожильных гибких кабелей.

Таким образом, частотный блок может управлять станком в трех координатах при условии, что вертикальная подача станка будет приспособлена для программного управления. Электронная часть *СПУ* позволяет без переделок записать программу для третьего канала.

Как видно из рисунков, все элементы частотного блока имеют свободный доступ, что облегчает монтаж и наладку системы. Настройка элементов полосовых фильтров осуществляется при помощи полупеременных конденсаторов, расположенных на отдельных гетинаксовых панелях.

СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД И ОСНАСТКА СТАНКА

Система программного управления, построенная на базе магнитофона МЭЗ-15, может работать не только с металлорежущими станками любого типа, но и с другими устройствами, требующими непрерывного управления. Так как в настоящее время такие системы получили наибольшее распространение в металлорежущей промышленности, представляется целесообразным дать краткое описание основных принципов, лежащих в основе построения следящих приводов управляемых станков, и особенностей их оснастки.

На объекте управления, станке, располагаются по каждой подаче двигатели и силовые механические передачи. Система программного управления может работать с приводом любого типа, построенным на ЭМУ, тиратронах, муфтах и т. д.

Механическая передача от исполнительного двигателя к столу станка должна быть выполнена с достаточной жесткостью и минимальным люфтом. Невыполнение этих требований может привести к возникновению колебаний в следящей системе, делающих невозможной обработку деталей на станке. Передаточное отношение редуктора от двигателя к столу станка для получения высоких скоростей обработки должно быть минимальным, а для получения плавности движения на малых скоростях его надо увеличивать. Оптимальное значение передаточного отношения зависит от многих факторов, к которым относятся моменты нагрузки, маховой момент двигателя, момент нагрузки сухим трением и др.

В качестве датчиков перемещения в фазовых системах программного управления используются поворотные трансформаторы типа ВТМ, по одному на каждую подачу.

Важное значение имеет передаточное отношение от датчика к столу станка, так как неправильный выбор его может привести к большой ошибке при обработке. С точки зрения получения минимальных ошибок передаточное отношение должно выбираться максимальным. Это требование относится к уменьшению ошибки, вызываемой системой записи-воспроизведения программы. Так как точность воспроизведения *СПУ* лежит в пределах $\pm 6°$, то для снижения ошибки, вызываемой погрешностями при записи-воспроизведении программы передаточное отношение надо делать большим. Например, при передаточном отношении 1,5 *мм* на 360° ошибка на столе станка при точности воспроизведения $\pm 6°$ будет лежать в пределах ± 25 *мк*, что является вполне допустимым для современных фрезерных станков.

Ограничение увеличения передаточного отношения ставит инерционность элементов следящей системы. При погрешности, вызываемой свойствами следящего привода, превышающей половину периода изменения фазы на выходе датчика положения, следящая система выпадает из синхронизма, и тогда ошибка на детали резко возрастает.

Датчики положения типа поворотных трансформаторов могут присоединяться к подачам либо непосредственно через ходовой винт, либо при помощи реечного зацепления. Если в станках, предназначенных для программного управления, используется беззазорная пара винт—гайка, то первый вид присоединения датчика положения обеспечивает достаточно высокие динамические свойства и допустимую точность измерения. При тщательном изготовлении такие пары могут снизить погрешность измерения до 5—10 *мк*.

Присоединение датчика к ходовому винту повышает общую надежность системы, так как благодаря этому исключаются сложные и дорогие приборные редукторы с большим повышающим передаточным отношением. В этом варианте поворотные трансформаторы присоединяются либо непосредственно к ходовому винту или к одному из валов силового редуктора от двигателя к столу.

Второй вариант присоединения датчиков положения требует высококачественного исполнения всех звеньев редуктора, к которым предъявляются высокие требования по жесткости и прочности. Это связано с тем, что при большом передаточном отношении в редукторе возникают настолько большие усилия, что последний быстро изнашивается и перестает нормально работать из-за появления значительных люфтов, что приводит к потере точности измерения и нарушает устойчивость системы. Для предотвращения автоколебаний приходится сильно уменьшать коэффициент усиления следящей системы.

Таким образом, наилучшим способом соединения датчиков положения со столом станка, особенно при использовании многополюсных поворотных трансформаторов, следует считать первый вариант при условии изготовления беззазорной пары винт—гайка.

Дооборудование металлорежущих станков для приспособления их под программное управление требует большой и трудоемкой работы. Поэтому вначале следует изготовить электронную часть, располагаемую в корпусе магнитофона, что вполне под силу любому коллективу радиолюбителей. Как только это устройство будет изготовлено, следует приступить к его настройке по приведенной методике. Переделывать станок под программное управление можно начинать только после предварительной консультации и под наблюдением специалистов.

Предлагаемое устройство программного управления может быть использовано в ряде технологических процессов, например, для вязки телефонных жгутов, для управления портальными кранами и кузнечно-прессовыми механизмами.

СОДЕРЖАНИЕ